

В.М. Куцевалов
— А.А. Ковалюк

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ
РАСЧЕТ
БЕСКОНТАКТНЫХ
СИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
С ВНЕШНИМ
МАГНИТОПРОВОДОМ**

Академия наук Латвийской ССР
Физико-энергетический институт

В.М. Кудевалов
Л.А. Ковалюк

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ
БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
С ВНЕШНИМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Издательство "Зинатне"

Рига 1973

В.М. Куцевалов, Л.А. Ковалюк. ЭЛЕКТРОМАГ-
НИТНЫЙ РАСЧЕТ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С
ВНЕШНИМ МАГНИТОПРОВОДОМ. Рига, "Зинатне", 1973, 88с.

Приведена методика электромагнитного расчета бесконтакт-
ных синхронных электродвигателей с внешним магнитопроводом.
Необходимый для расчета справочный материал дан в виде таб-
лиц, графиков в соответствии с международной системой еди-
ниц СИ. Табл. 2, илл. 27, библи. 104 назв.

© Издательство "Зинатне", 1973

К 3 - 3 - 10 - 159
М811(11) - 73

В в е д е н и е

В настоящее время наиболее распространенными электродвигателями переменного тока являются асинхронные двигатели, простые по конструкции, технологичные в производстве и обладающие высокой надежностью в эксплуатации. Низковольтные асинхронные электродвигатели мощностью от 0,12 до 400 кВт потребляют более 40 % всей электрической энергии, вырабатываемой энергосистемами страны [102].

Однако асинхронные электродвигатели уже не могут удовлетворять требованиям ряда конкретных приводов, в частности, таких, в которых: 1) по условиям технологии целесообразно постоянство скорости вращения двигателя независимо от величины его нагрузки; 2) по условиям технологии невозможно осуществить достаточно полную загрузку двигателя; 3) приводы получают питание от протяженных и сильно разветвленных сетей, и др. [104].

В таких приводах определенные преимущества имеют синхронные двигатели.

Отечественной промышленностью изготавливаются синхронные реактивные двигатели типа РС мощностью 1,1 ; 1,5 ; 3,0 и 4,0 кВт на 1500 об/мин. Однако у этих двигателей низкие энергетические показатели - к.п.д., $\cos\varphi$ и малая перегрузочная способность.

Относительно двигателей с электромагнитным возбуждением до недавнего времени существовало мнение о нецелесообразности их применения при мощностях менее 50 - 100 кВт из-за большей сложности конструкции и меньшей надежности, обусловленной наличием щеточно-контактного устройства.

Таблица I

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ УНИФИЦИРОВАННОЙ СЕРИИ СДБ, МАШИН СОВ 31-4 и СЭ 42-4

Тип электро- двигателя	При номинальной нагрузке					Перегру- зочная способ- ность $M_{\max}/M_{\text{ном}}$	Асинхронный пуск				Вес, кг	
	мощ- ность, кВт	ско- рость вращения, об/мин	ток статора (а) при напряжении		$\cos\varphi$		η , %	$I_{\text{пуск}}$	$M_{\text{пуск}}$	$M_{\text{вх}}$		
			220В	380В								
												к. п. д.
СДБ 31-4	1,5	1500	5,0	2,9	78,0/1,0	Не менее 1,5	Не бо- лее 3	Не ме- нее 0,8	Не ме- нее 0,25	56		
СДБ 41-4	3,0	1500	9,0	5,2	87,0/1,0					91		
СДБ 51-4	5,5	1500	16,6	9,6	88,0/1,0					136		
СДБ 71-4	11,0	1500	32,6	18,8	89,0/1,0					265		
СДБ 81-4	20,0	1500	58,5	33,4	91,0/1,0					396		
СДБ 91-4	40,0	1500	116,0	66,8	91,5/1,0	500						
СДБ 81-6	17,0	1000	48,1	28,8	89,7/1,0	396						
СОВ 31-4	1,5	1500	5,0	2,9	78,0/1,0	36						
СЭ 42-4	3,0	1500	9,0	5,2	87,0/0,995	57						

х) Значения к. п. д. даны с учетом потерь на возбуждение.

Латвийской ССР совместно с Истринским отделением ВНИИЭМ. По сравнению с распространенными типами асинхронных машин рассматриваемые электродвигатели оказываются более экономичными в эксплуатации, хотя имеют больший вес и стоимость.

Повышенный вес электродвигателей СДВ обусловлен унификацией основных узлов и деталей с бесконтактными синхронными генераторами серии СГВ.

Разработка бесконтактных синхронных электродвигателей специализированного исполнения (без унификации с другими машинами) позволяет приблизить их вес и стоимость к соответствующим по мощности асинхронным двигателям типа АО2. В качестве примера таких машин могут служить электродвигатели СДВ 3И-4 и СДВ 42-4, технические данные которых приведены также в таблице I.

2. Конструктивные особенности бесконтактных синхронных электродвигателей

Рассмотрению конструктивных особенностей синхронных бесконтактных машин с когтеобразными полюсами посвящен ряд работ [2, 4, 7 - 10, 13, 16 - 19, 22, 25 - 32, 34, 42 - 44, 46, 52, 58, 60, 64, 68, 76, 83, 87, 89, 96, 101, 104].

Среди известных конструктивных решений бесконтактных синхронных машин с электромагнитным возбуждением наиболее простую конструкцию имеет бесконтактная машина с когтеобразными полюсами и внешним магнитопроводом. В качестве примера на рис. 1-3 показаны варианты конструкции бесконтактной машины этого типа.

Статор бесконтактного синхронного двигателя не имеет принципиальных отличий от статоров обычных синхронных или асинхронных двигателей.

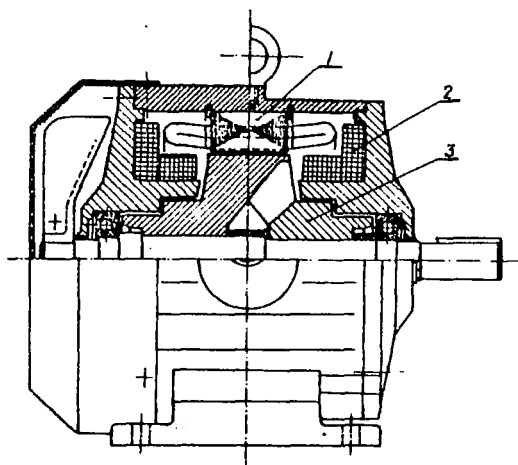


Рис. 1. Устройство бесконтактного синхронного электродвигателя СО 51-6 первой опытной серии, разработанной в ФЭИ АН Латв ССР [52]: 1 - статор с обмотками (главной и дополнительной); 2 - неподвижные обмотки возбуждения; 3 - ротор с массивными когтеобразными полюсами.

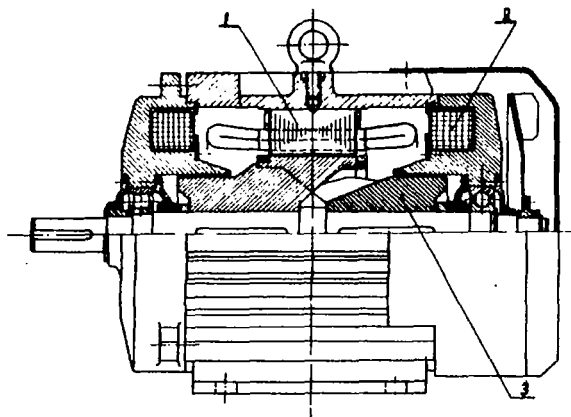


Рис. 2. Устройство бесконтактного синхронного электродвигателя СДБ 81-4: 1 - статор с обмоткой; 2 - неподвижные обмотки возбуждения; 3 - ротор с массивными когтеобразными полюсами [104].

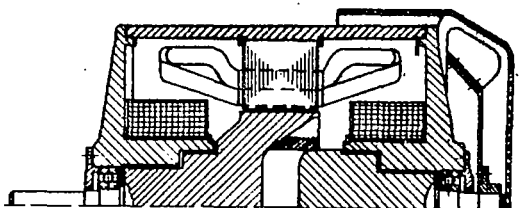


Рис. 3. Устройство бесконтактного синхронного электродвигателя СЭ 42-4.

Стальная станина может быть выполнена ребристой (рис. 1, 2) или гладкой (рис. 3).

Двигатель охлаждается потоком воздуха от вентилятора, расположенного на втором (нерабочем) конце вала и закрытого кожухом, который направляет поток охлаждающего воздуха вдоль станины.

Ротор состоит из двух насаженных на вал (рис. 1, 2) или сваренных между собой полюсных систем (рис. 3).

Кольцевые выступы стальных подшипниковых щитов, охватывающие цилиндрические части полюсных систем ротора, образуют с последними два дополнительных воздушных зазора между вращающейся частью магнитопровода индуктора — полюсными системами с когтеобразными полюсами — и неподвижной его частью — подшипниковыми щитами и станиной.

На кольцевых выступах подшипниковых щитов размещаются катушки обмотки возбуждения, что значительно упрощает конструкцию этой обмотки по сравнению с обмоткой ротора обычного явнополюсного исполнения, в особенности при большом числе полюсов.

Поскольку обмотка возбуждения располагается на значитель-

ном расстоянии от активных поверхностей полюсов, в машине имеются развитые магнитные потоки рассеяния, относительная величина которых оказывается более высокой, чем в роторе обычной явнополюсной конструкции.

Распределение магнитных потоков в бесконтактном синхронном двигателе показано на рис. 4.

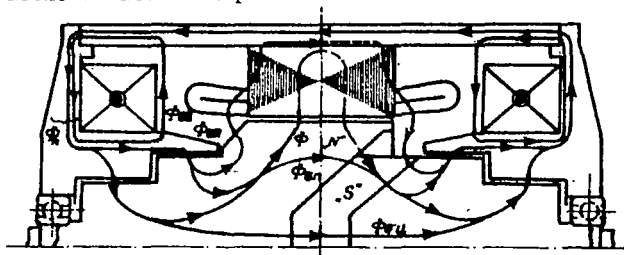


Рис. 4. Потоки рассеяния индуктора машины с когтеобразными полюсами и внешним магнитопроводом: Φ - полный магнитный поток машины; Φ - полезный поток; Φ_{68} - поток рассеяния обмотки возбуждения; Φ_{6a} - поток внешнего рассеяния полюсов; $\Phi_{6л}$ - поток межполюсного рассеяния; $\Phi_{6ц}$ - поток рассеяния по торцам цилиндров полюсных систем [76].

Стремление уменьшить потоки рассеяния в роторе привело к тому, что в ряде машин вал изготавливается из немагнитной стали или же сварным с немагнитной вставкой между полюсными системами.

С той же целью выполняют сварную конструкцию роторов без сплошного вала (см. рис. 3).

В бесконтактных машинах рассматриваемого типа оказывается нецелесообразным увеличение относительной длины* более $\Lambda = 0,62 + 0,65$, т.к. это приводит к уменьшению магнитной индукции в

* Относительная длина Λ представляет собой отношение активной длины l_a к диаметру расточки статора D , т.е. $\Lambda = \frac{l_a}{D}$.

воздушном зазоре [44]. По этой причине бесконтактные электродвигатели по сравнению с асинхронными электродвигателями той же мощности имеют больший диаметр D и меньшую длину l .

При конструировании магнитопроводов бесконтактных машин рассматриваемого типа обычно стремятся выполнить их таким образом, чтобы магнитная индукция во всех сечениях была примерно одинаковой. В [9] показано, что в этом случае магнитопроводы получают наиболее экономичными.

Для электродвигателей предпочтительной является конструкция ротора с трапецеидальными наконечниками полюсов, которая позволяет существенно уменьшить магнитные потоки рассеяния и улучшить к.п.д. машины [96].

Способ размещения катушек обмотки возбуждения на неподвижных частях машины (см. рис. I - 3) зависит от конкретных целей, поставленных перед разработчиком. Например, катушки обмотки возбуждения, размещенные под лобовыми частями обмотки, наиболее экономичны в отношении обмоточного провода; при размещении их над лобовыми частями облегчается сборка и разборка машины; если разместить катушки в углублениях подшипниковых щитов, улучшается их тепловой режим и т.д.

Питание обмотки возбуждения (ОВ) может осуществляться от дополнительной обмотки статора через выпрямительный блок (машины опытной серии СО [28], рис. 5). Основным недостатком этой схемы заключается в некотором уменьшении тока возбуждения при увеличении нагрузки.

Питание ОВ может быть осуществлено также непосредственно от сети через понижающий трансформатор и выпрямительный блок (машины серии СДБ, [104], рис. 6 - 8).

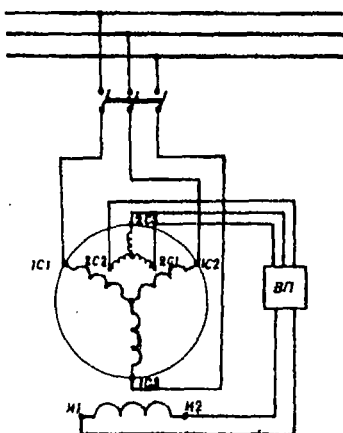


Рис. 5. Схема бесконтактного синхронного электродвигателя С0 основного исполнения: IC_{1-3} - главная обмотка статора; IC_{1-3} - дополнительная обмотка статора; $M_{1,2}$ - обмотка возбуждения; ВП - выпрямитель возбуждения и пусковая автоматика системы возбуждения.

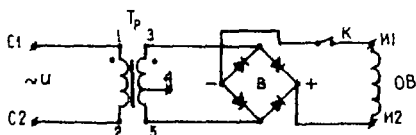


Рис. 6. Принципиальная схема питания обмотки возбуждения электродвигателя унифицированной серии СДБ : $C1 - C2$ - зажимы статорной обмотки; 1 - 2 - первичная обмотка трансформатора Tr ; 3 - 5 - вторичная обмотка трансформатора Tr с дополнительным отводом 4 ; В - выпрямитель; К - выключатель; ОВ - обмотка возбуждения.

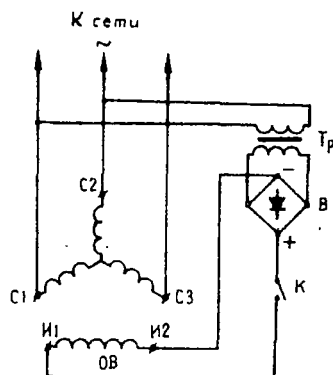


Рис. 7. Принципиальная схема бесконтактного электродвигателя унифицированной серии СДБ основного исполнения: С1, С2, С3 — зажимы обмотки статора; И1 — И2 — зажимы обмотки возбуждения; Тр, К, В — элементы схемы питания обмотки возбуждения (см. рис. 6).

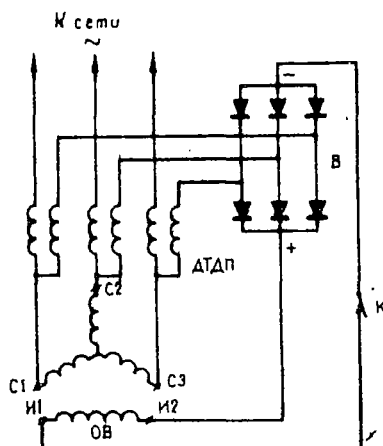


Рис. 8. Принципиальная схема компаундирования электродвигателя унифицированной серии СДБ: ДТДП — двухобмоточные трансформаторы двойного питания; С1, С2, С3 — зажимы обмотки статора; И1 — И2 — зажимы обмотки возбуждения; В — трехфазный выпрямитель; К — выключатель.

3. Электромагнитный расчет

Как известно, в настоящее время электромагнитный расчет обычных синхронных машин производится в соответствии с методиками, изложенными в [12, 14, 81].

При расчете бесконтактных синхронных машин необходимо учитывать их характерные особенности: наличие внешнего магнитопровода, сложной полюсной системы ротора, определяющей повышенные потоки рассеяния, и т.д.

Эти вопросы рассматривались в работах [3, 7, 22 - 24, 34, 46, 52, 65] и других, которые также должны использоваться при расчете.

Общим неудобством расчета по известным методикам является то, что основные энергетические параметры машин выясняются только в конце расчета. Например, при получении в конце расчета к.п.д., не соответствующего величине, принятой в начале расчета, необходимо повторить заново весь расчет машины.

В изложенной ниже методике, представляющей собой развернутый формуляр электромагнитного расчета, использованы основные положения методик [12, 14, 81], введены новые разделы и пункты расчета в соответствии с данными, приведенными в работах, которые упомянуты в списке литературы. Изменена последовательность определения или расчета некоторых величин: после определения номинальных величин и размеров сердечника статора рассчитываются активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки статора; проверяется правильность выбора в начале расчета коэффициента K_D , характеризующего изменение магнитного потока статора при нагрузке машины.

Если расчетное значение K_E существенно отличается от принятой ранее величины, то небольшой по объему расчет повторяется с учетом полученной величины K_E . Затем рассчитываются м.д.с. статора с учетом реальных магнитных нагрузок и определяется коэффициент насыщения активной стали статора при номинальной нагрузке машины. По этим величинам магнитных индукций в расчетных сечениях магнитопровода статора и воздушном зазоре находится величина отдельных потерь и коэффициент полезного действия без учета потерь на возбуждение, а затем по величине последнего производится корректировка небольшого по объему, выполненного ранее расчета. Далее рассчитывается величина угла рассогласования между вектором напряжения сети и вектором E_0 (осью полюсов ротора), которая используется для определения м.д.с. возбуждения машины, и окончательно определяется величина к.п.д. с учетом потерь на возбуждение.

Но м и н а л ь н ы е д а н н ы е , являющиеся основными исходными величинами для электромагнитного расчета:

Мощность номинальная	P_n , кВт
Число фаз	m
Напряжение сети (линейное)	U_n , в
Частота сети	f , гц
Скорость вращения синхронная	n , об/мин
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$
Соединение фаз обмотки статора	Y или Δ

Ниже приводятся основные разделы электромагнитного расчета и формулы для определения расчетных величин. Даются также пояснения о выборе тех или иных параметров, входящих в

формулы, и ссылки на работы, в которых имеются необходимые данные.

Номинальные величины и главные размеры:

1. Число пар полюсов - p :

$$p = \frac{60f_1}{n}.$$

2. Фазовый ток статора - I_1 , а:

$$I_1 = \frac{P_H \cdot 10^3}{\eta \cos \varphi \sqrt{3} U_L}.$$

Опыт расчета и постройки бесконтактных синхронных двигателей показывает, что величины их к.п.д. получаются примерно одинаковыми с величинами к.п.д. асинхронных двигателей соответствующей мощности. Это позволяет использовать для предварительного выбора к.п.д. рассматриваемых машин соответствующие данные по асинхронным двигателям (например, [81], табл. 13-2а).

В случае отсутствия оговоренных в задании требований к величине коэффициента мощности его величина принимается равной $\cos \varphi = 1$, так как при этом достигается наиболее экономичный режим работы электродвигателей малой мощности.

3. Расчетная мощность - P' , ква:

$$P' = \frac{K_E P_H}{\eta \cos \varphi},$$

где K_E предварительно определяется по графику рис. 9, построенному по экспериментальным и расчетным данным электродвигателей малой мощности.

4. Внутренний диаметр расточки статора - D , мм:

$$D = K_H \cdot 0,39 \sqrt[3]{\frac{C_A \cdot P}{\Lambda \cdot n}}.$$

В целях снижения себестоимости и сокращения сроков изготовления отдельных образцов бесконтактных синхронных машин часто используются листы статора серийных асинхронных машин. Например, в спроектированных машинах опытной серии СО, унифицированной серии СДБ использованы листы статоров асинхронных двигателей единой серии АО2.

Как было отмечено выше, наиболее полное использование активных материалов в синхронном электродвигателе достигается при $\Lambda \approx 0,65$, что требует выполнения машин с бóльшим наружным диаметром, чем габарит соответствующего по мощности асинхронного двигателя. Например, машины СО и СДБ имеют пакет статора на один габарит выше соответствующих по мощности асинхронных двигателей.

Это обстоятельство при определении диаметра D учитывается коэффициентом K_H . В случае использования листов двигателей АО2 $K_H \approx 1,15$.

Постоянная Арнольда при этом может быть определена по рис. 10.

5. Наружный диаметр пакета статора - D_a , м.

Приблизленно определяется в зависимости от числа полюсов $2p$ по формулам 13-9 [81] и уточняется, например, по таблице 1-1 [81].

6. Число пазов на полюс и фазу - q_1 .

Выбирается в соответствии с разделом 13-4 [81].

7. Число пазов статора - Z_1 :

$$Z_1 = 2m_1 \cdot p \cdot q_1.$$

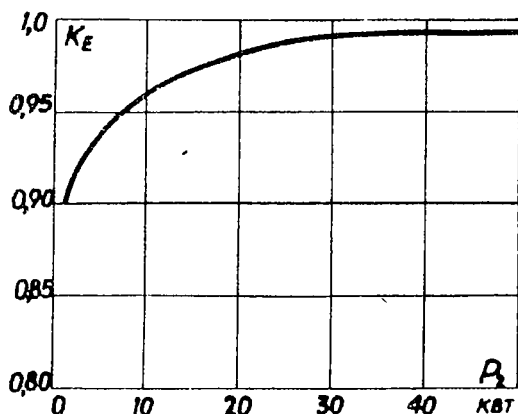


Рис. 9. Величина коэффициента K_E в зависимости от полезной мощности на валу электродвигателя P_2 [97] .

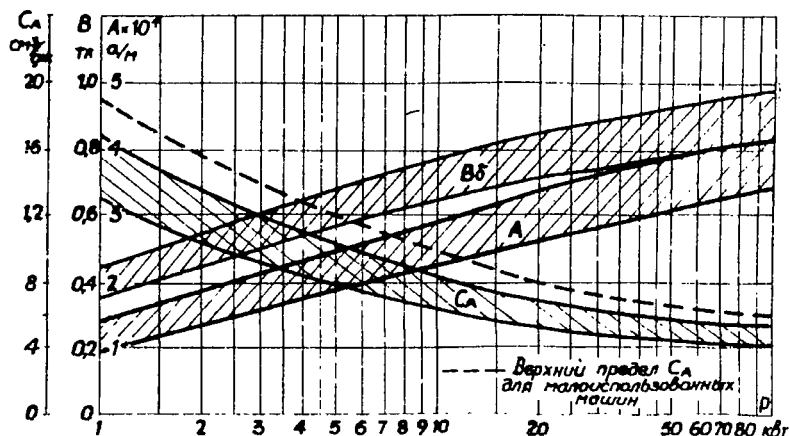


Рис. 10. Зависимость электромагнитных нагрузок и постоянной Арнольда от расчетной мощности асинхронной машины (по данным [95]).

8. Полукное деление, выраженное количеством пазов статора

- τ_n :

$$\tau_n = \frac{Z_1}{2p} .$$

9. Полукное деление статора - τ , м:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} .$$

10. Зубцовое деление статора - t_{z1} , м:

$$t_{z1} = \frac{\pi D}{Z_1} .$$

11. ¹ Главный воздушный зазор - δ_1 , м.

На основании опыта проектирования рекомендуется принимать в соответствии с мощностью машины:

$$\delta_1 = (0,5 + 0,9)10^{-3} \text{ для машины } 1,5 + 10 \text{ кВт};$$

$$\delta_1 = (0,9 + 1,7)10^{-3} \text{ для машины } 10 + 20 \text{ кВт};$$

$$\delta_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ и выше для машин более } 40 \text{ кВт}.$$

12. Шаг обмотки по пазам - y_n :

$$y_n = \frac{Z_1}{2p} \mp \varepsilon ,$$

где ε - укорочение обмотки, берется таким, чтобы y_n было целым числом.

13. Коэффициент укорочения шага - β_1 :

$$\beta_1 = \frac{y_n}{\tau_n} .$$

β_1 находится в пределах

для $2p = 4$ и 6 - $0,78 + 0,89$;

для $2p = 2$ может падать до $0,61$.

14. Коэффициент скося пазов для основной волны - $K_{ск}$ [12].

Рекомендуется применять окос пазов статора на одно пазовое деление статора для машин с массивными полюсами и беличьей клеткой на роторе, поскольку это позволяет уменьшить зависимость величины пускового момента от начального пространственного положения ротора.

15. Обмоточный коэффициент основной волны для симметричных обмоток при наличии укорочения шага и скося пазов - K_{w1} [12].

Так как электродвигатели выполняются с целым числом пазов на полюс и фазу, имеют шестизонную обмотку (60-градусная зона), обмоточный коэффициент рассчитывается по формуле

$$K_{w1} = \frac{0,5}{q_1 \sin 30^\circ / q_1} \sin\left(\beta_1 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot K_{ск}.$$

16. Коэффициент полюсного перекрытия - α_p .

Для машин с роторами, имеющими трапециевидальные наконечники полюсов, обычно принимают среднее значение:

$$\alpha_p = 0,6 + 0,7.$$

Для машин с прямоугольными наконечниками полюсов обычно

$$\alpha_p = 0,7 + 0,8.$$

17. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия - α_δ и коэффициент формы кривой - K_B .

Определяются по рис. 6-7 [81] в зависимости от величин α_p и δ_1/τ .

18. Индукция в главном воздушном зазоре - B_{δ_1} , тл и линейная нагрузка A , а/м.

Предварительно определяются по рис. IO в зависимости от мощности машины - P.

19. Расчетная длина статора - ℓ_δ , м:

$$\ell_\delta = \frac{0,61 \cdot P^1 \cdot 10^4}{\alpha_\delta \cdot K_B \cdot K_{w1} \cdot B_{\delta 1} \cdot A \cdot D^2 \cdot \pi}.$$

20. Магнитный поток полюса - Φ , вб:

$$\Phi = \alpha_\delta \cdot T \cdot \ell_\delta \cdot B_{\delta 1}.$$

21. Число витков в фазе - w_1 :

$$w_1 = \frac{K_E \cdot U_1}{4 \cdot K_B \cdot K_{w1} \cdot f_1 \cdot \Phi}.$$

22. Число витков в секции - w_c :

$$w_c = \frac{m_1 w_1}{Z_1}.$$

23. Уточнение величины линейной нагрузки - A, а/м:

$$A = \frac{I_1 \cdot 6 \cdot w_1}{\pi \cdot D}.$$

24. Уточнение магнитной индукции - $B_{\delta 1}$, тл:

$$B_{\delta 1} = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \cdot T \cdot \ell_\delta}.$$

25. Форма паза и основные его размеры.

Выбираем паз по рис. II.

26. Конструкция изоляции и изоляционные материалы статорных обмоток.

Выбираются, например, в соответствии с [80] или [81] .

27. Площадь паза за вычетом пазовой изоляции и площади клина - S'_n , м².

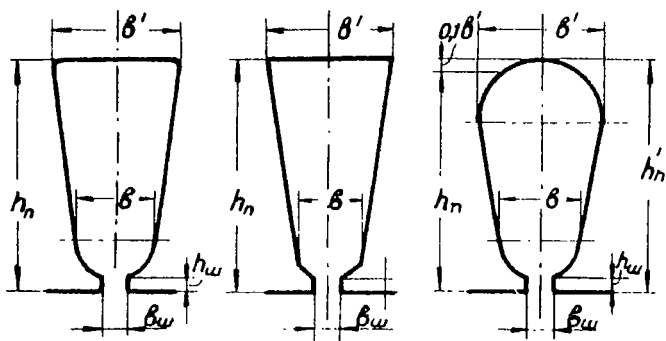


Рис. II. Конфигурации пазов статора.

28. Плотность тока в статорной обмотке — Δ_a , а/м².

Плотность тока в статорной обмотке ориентировочно можно принять $\Delta_a = (3,8 + 5,8)10^6$, а/м². Большие значения относятся к машинам с большим главным воздушным зазором и катушками возбуждения, сравнительно удаленными в аксиальном направлении от лобовых частей статорной обмотки.

29. Сечение проводника фазы статора — S_a , м²:

$$S_a = I_1 / \Delta_a .$$

30. Марка провода обмотки статора и его размеры:

$$\frac{\text{диаметр без изоляции}}{\text{диаметр с изоляцией}} = \frac{d}{d_{из}} , \text{ сечение } S_a .$$

Марка провода в зависимости от класса нагревостойкости обмоток проектируемой машины выбирается по таблицам 4, 5, приведенным, например, в [81, 92].

Диаметр провода и сечение, близкое к расчетному, выбираются по таблице IY-I [81] с учетом ранее выбранной

марки провода.

31. Коэффициент заполнения паза — K_3 .

Обычно K_3 находят в соответствии с выражением

$$K_3 = \frac{2 \cdot a_1 \cdot w_c \cdot d_{u3}^2}{S_n}$$

Увеличение K_3 является одним из средств повышения использования активной части электродвигателей. В настоящее время при ручной укладке катушек выпных обмоток в пазы практически достигается K_3 порядка $0,72 + 0,73$. Некоторые зарубежные фирмы (например, "Шорх", ФРГ) при ручной укладке достигают значения K_3 до $0,85$ [102].

32. Средняя длина обмотки статора — $\ell_{ср}$, м:

$$\ell_{ср} = 2 (\ell_8 + \ell_{л1}),$$

где $\ell_{л1}$ — средняя длина лобовой части, м;
для обмоток с мягкими секциями.

$$\ell_{л1} = K_{л1} \cdot \tau_y + 2B,$$

для обмоток с жесткими секциями

$$\ell_{л1} = K_{л1} \cdot \tau_y + 2B + h_n.$$

В этих формулах

τ_y — средняя ширина секции, которая рассчитывается по формуле

$$\tau_y = \beta_1 \frac{\pi (D + h_n)}{2p}, \text{ м.}$$

Коэффициент $K_{л1}$ и величина B определяются по таблице 4-12 [81].

33. Длина вылета лобовых частей обмотки статора - ℓ_g , м:

$$\ell_g = K_{B1} \cdot \tau_y + B ,$$

где коэффициент K_{B1} и величина B определяются по табл. 4-12 [81].

34. Длина обмотки фазы статора - L_ϕ , м:

$$L_\phi = \ell_{cp} \cdot W_1 .$$

35. Сопротивление фазы статора постоянному току при расчетной температуре , ом:

$$\tau_1 = \frac{L_\phi}{\gamma \cdot \alpha_1 \cdot S_\alpha} ,$$

где α_1 - число параллельных проводов в фазе ;

γ - удельная проводимость, м/ом·мм², принимается в зависимости от расчетной температуры из табл. 2 [12].

Таблица 2

Материал обмотки	Расчетная температура, °К (°С)		
	293 (20)	348 (75)	388 (115)
Медь	56·10 ⁶	46·10 ⁶	41·10 ⁶
Алюминий	34·10 ⁶	28·10 ⁶	25·10 ⁶

Для машин, превышения температуры обмоток которых соответствуют классам изоляции А, Е, В, применяют расчетную температуру 348°К (75°С); для машин с превышениями температур обмоток, соответствующими классам F , Н, - 388°К (115°С).

36. Коэффициент проводимости пазового рассеяния обмотки статора - λ_{m1} .

Коэффициент проводимости пазового рассеяния определяется в соответствии с конфигурацией выбранного ранее паза.

На рис. 12 приведены наиболее часто употребляемые формы полузакрытых пазов.

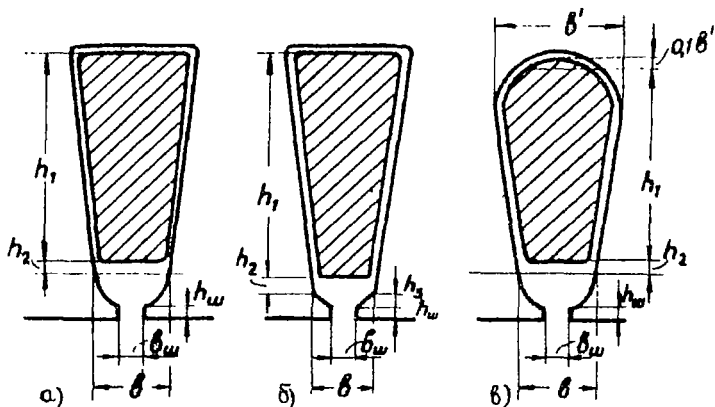


Рис. 12. К расчету пазового рассеяния.

Для трапециевидных пазов значения $\lambda_{п1}$ определяются по формулам [81] :

1) полукруглая часть у открытия паза (рис. 12, а, в)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3b} K_p + \left(0,785 - \frac{b_{ш}}{2b} + \frac{h_2}{b} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) \cdot K'_p ;$$

2) трапециевидная часть у открытия паза (рис. 12, б)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3b} K_p + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_2}{b + 2b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) \cdot K'_p ,$$

где K_p и K'_p определяются по рис. 7, 3 [81] в зависимости от коэффициента сокращения шага β_1 .

37. Коэффициент воздушного зазора - K_{δ_1} :

$$K_{\delta_1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma \cdot \delta_1} ,$$

где

$$\gamma = \frac{(\delta_{ш}/\delta_1)^2}{5 + \delta_{ш}/\delta_1} .$$

38. Проводимость дифференциального рассеяния - λ_{g1} [81] :

$$\lambda_{g1} = 0,9 \frac{t_{z1} (q_1 K_{w1})^2 \cdot K_{ш1}}{\delta_1 \cdot K_{\delta_1}} \delta_{g1} \cdot K_{cg} ,$$

где

$$K_{ш1} = 1 - 0,033 \delta_{ш}^2 / t_{z1} \cdot \delta_1 ;$$

δ_{g1} определяется по рис. 7.16 в зависимости от величины коэффициента β [81] ;

$K_{cg} = 0,85 + 0,95$ - коэффициент, который учитывает неравномерность воздушного зазора явнополюсной синхронной машины.

39. Проводимость рассеяния лобовых частей - $\lambda_{\lambda 1}$ [100] :

$$\lambda_{\lambda 1} = 0,955 \frac{q_1 \cdot K_p^2 \cdot \tau_{\lambda} \cdot K_{\lambda} \cdot K_{\lambda \delta}}{\ell_{\delta}} ,$$

где

$K_p = \frac{0,5}{q_1 \sin 30^\circ q_1}$ - коэффициент распределения обмотки статора ;

$\tau_{\lambda} = \frac{\pi \cdot D_{\lambda}}{2p}$ - полюсное деление по среднему диаметру лобовых частей D_{λ} , м;

$K_{\lambda} = \frac{0,5 \cdot \ell_{\lambda 1}}{2\ell_{\delta} \sqrt{1 + \frac{\beta_1 \tau_{\lambda}}{2\ell_{\delta}}}}$ - коэффициент, учитывающий влияние идеализации лобовых частей обмотки статора. на величину лобового

рассеяния;

$K_{\lambda\delta} = 1,04 + 1,1$ - коэффициент, учитывающий увеличение магнитной проводимости лобовых частей обмотки статора за счет потоков рассеяния по пути массивных ферромагнитных подшипниковых щитов и станины.

40. Суммарная проводимость - $\Sigma \lambda$:

$$\Sigma \lambda = \lambda_{\text{п1}} + \lambda_{g1} + \lambda_{\lambda 1}.$$

41. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора -

x_1 , ом:

$$x_1 = 0,158 \cdot f_1 \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l_{\delta}}{\rho \cdot q_1} \Sigma \lambda.$$

42. Полное сопротивление обмотки статора - Z_1 , ом:

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}.$$

43. Величина внутреннего напряжения электродвигателя - U_{μ} в [100]:

$$U_{\mu} = \sqrt{U_1^2 + (I_1 Z_1)^2 - 2 U_1 \cdot I_1 \cdot \frac{Z_1 (1 - \tan^2 \varphi_1/2) - x_1 2 \tan \varphi_1/2}{1 + \tan^2 \varphi_1/2}},$$

где φ_1 - фазовый угол тока - I_1 , град;

U_1 - напряжение фазы обмотки статора, в.

44. Величина коэффициента - K_E :

$$K_E = U_{\mu} / U_1.$$

Если K_E существенно отличается от ранее принятой величины, производится необходимая корректировка выполненного расчета.

Магнитная цепь статора

45. М.д.с. главного воздушного зазора - F_{δ} , а:

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot K_{\delta_1} \cdot \delta_1 \cdot B_{\delta_1} \cdot 10^6.$$

46. Ширина зуба статора - b_{z1} , м (рис. II) :

$$b_{z1} = \frac{\pi (D + 2h_n)}{Z_1} - b' \quad (\text{рис. II, а, б});$$

$$b_{z1} = \frac{\pi (D + 2h_n - b')}{Z_1} - b' \quad (\text{рис. II, в}).$$

47. Индукция в зубцах статора - B_{z1} , тл:

$$B_{z1} = \frac{t_{z1} \cdot B_{\delta_1}}{b_{z1} \cdot K_c},$$

где K_c - коэффициент заполнения пакета, определяется по таблице 2-4 [81] в зависимости от толщины и изоляции электротехнической стали.

48. М.д.с. зубцов статора - F_{z1} , а :

$$F_{z1} = 2h_n \cdot H_z$$

(H_z находим в зависимости от марки электротехнической стали, например, по таблицам П-1, П-3 [81]).

49. Высота спинки статора - h_{a1} , м:

$$h_{a1} = \frac{D_a - D - 2h_n}{2}.$$

50. Индукция в спинке статора - B_{a1} , тл.

51. Средняя длина магнитных линий в спинке статора - L_1 , м:

$$L_1 = \frac{\pi(D_g - h_a)}{2p}.$$

52. М.д.с. спинки статора - F_{a1} , а:

$$F_{a1} = \xi \cdot H_{a1} \cdot L_1,$$

где ξ - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения магнитной индукции в спинке статора и определяемый по рис. 6.17 в соответствии с величиной магнитной индукции B_a [81].

53. М.д.с. холостого хода - F_{Ns} , а:

$$F_{Ns} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{a1}.$$

54. Коэффициент насыщения пакета статора - K_{μ} :

$$K_{\mu} = \frac{F_{Ns}}{F_{\delta}}.$$

55. Величина угла - $\beta(L\dot{U}_0 \dot{U}_{\mu})$, град [99]:

$$\beta = \arccos \frac{U_1^2 + U_{\mu}^2 - (I_1 Z_1)^2}{2 U_1 U_{\mu}}.$$

56. Намагничивающий ток статора - I_{μ} , а [99]:

$$I_{\mu} = 0,474 \frac{p F_{Ns}}{W_1 f w_1}.$$

К. п. д. без учета потерь на возбуждение

57. Потери в меди обмотки статора - P_{m1} , кВт:

$$P_{m1} = m_1 I_1^2 \cdot \tau_1 \cdot 10^{-3}.$$

58. Потери в стали ярма статора - P_{cc} , кВт:

$$P_{cc} = 1,6 \cdot P_{cc}' \cdot G_{a1} \cdot 10^{-3},$$

где G_{a1} - вес ярма статора, находим по формуле

$$G_{a1} = h_{a1} \cdot l_{\delta} \cdot K_c \cdot Z_1 \cdot 2\rho \cdot \gamma_c, \text{ кг};$$

γ_c - удельный вес электротехнической стали, определяем по таблице 2-I [8I] ;

P_{cc}' - удельные потери листовой электротехнической стали, Вт/кг, определяются по таблице III-I в зависимости от величины магнитной индукции B_{a1} , Тл [8I].

59. Потери в зубцах статора - P_{cz} , кВт:

$$P_{cz} = 1,8 P_{cz}' \cdot G_{z1} \cdot 10^{-3},$$

где P_{cz}' - удельные потери в листовой электротехнической стали, Вт/кг, определяются по таблице III-I в зависимости от величины магнитной индукции B_{z1} , Тл [8I] ;

G_{z1} - вес зубцов статора, рассчитывается по формуле

$$G_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot l_{\delta} \cdot K_c \cdot Z_1 \cdot \gamma_c, \text{ кг}.$$

60. Потери в пакете статора от основного магнитного поля

- P_{c1} , кВт:

$$P_{c1} = P_{cc} + P_{cz}.$$

61. Механические потери - $P_{мх}$, кВт:

$$P_{мх} \approx 0,8 \cdot 2\rho \left(\frac{U}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{\frac{l_1}{0,19}},$$

где

$$U = \frac{\pi (D - 2\delta_1) \cdot n}{60}, \text{ м/сек};$$

l_1 - длина пакета статора.

62. Магнитная индукция третьей гармоники - B_3 :

$$B_3 = \sqrt{(B_{f3} - B_{d3})^2 + B_{q3}^2},$$

где B_{d3} и B_{q3} - магнитные индукции третьей гармоники соответственно по продольной и поперечной осям:

$$B_{d3} = B_{d3}^* \cdot B_{\delta_1} \quad \text{и} \quad B_{q3}^* = B_{q3} \cdot B_{\delta_1}.$$

Значения B_{d3}^* и B_{q3}^* определяются по кривым рис.

I4, I5 в соответствии с величинами коэффициента полюсного перекрытия α_p и отношения δ_1/τ [81];

B_{f3} - магнитная индукция третьей гармоники поля полюсов:

$$B_{f3} = (0,6 - B_{f3}^*) \cdot B_{\delta_1};$$

B_{f3}^* определяется по рис. I6 в соответствии с величинами α_p и δ_1/τ [1].

63. Добавочные потери в зубцах статора при к.з. и $f_1 = 50$ гц - P_{z3} , кВт:

$$P_{z3} \approx 10,7 \cdot P_{10/50} \cdot B_3^{5/4} \cdot G_{z1} \cdot 10^{-3},$$

где $P_{10/50}$ - удельные потери при максимальной индукции 1,0 тл, при синусоидальном ее изменении во времени при частоте перемагничивания 50 гц определяем по таблице III-I [81].

64. Добавочные потери на поверхности ротора при холостом ходе, вызванные зубчатостью статора, - $P_{пов}$, кВт [81]:

$$P_{пов} = 2\rho \cdot \tau \cdot \alpha_p \cdot \ell_p \cdot P'_{пов} \cdot 10^{-3},$$

где

$$P_{пов} = 23,3 \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10.000} \right)^{1,5} (B_0 \cdot t_{z1})^2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2,$$

$$B_0 = \beta_0 \cdot K_{\delta 1} \cdot B_{\delta 1},$$

β_0 определяется по рис. 8.4, в соответствии с величиной отношения $b_{ш}/\delta_1$ [81].

65. Добавочные потери на поверхности ротора от высших гармоник - P_{VR} , кВт [14]:

$$P_{VR} = 1,4 \cdot 4,5 \cdot 10^{-7} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,5} \frac{A^2 \cdot \tau^4 \cdot S_R}{100 \delta_1^2} \varphi(\beta_1),$$

где

S_R - активная поверхность полюсов ротора, м^2 :

$$S_R = \pi (D - 2\delta_1) \cdot \ell_{\delta} \cdot \alpha_p, \text{ м}^2;$$

$\varphi(\beta_1)$ определяется по рис. 13 в соответствии с величиной коэффициента укорочения шага β_1 .

66. Добавочные потери от зубцовых полей статора на поверхности ротора - P_{VZR} , кВт [14]:

$$P_{VZR} = 1,4 \cdot 1,14 \frac{A^2 \cdot t_{z1}^4 \cdot K_{w1}^2 \cdot \left(\frac{Z_1}{p} \right)^{1,5} \cdot K_{\delta}^2 \cdot S_R}{100 \cdot \delta_1^2},$$

где

$$K_{\delta}^2 = \left(\frac{\alpha_v}{\text{sh } \alpha_v} \right)^2;$$

$$\alpha_v = \frac{\pi \delta_1}{\tau} \cdot \frac{Z_1}{p}.$$

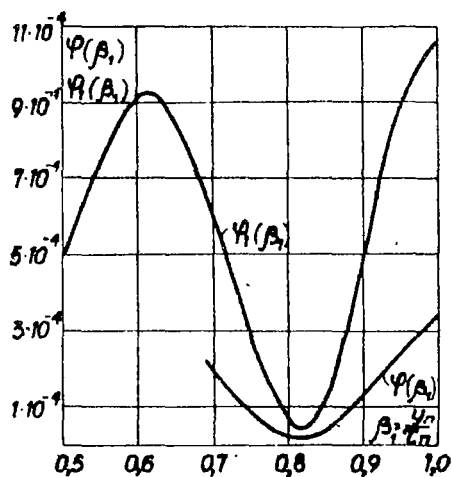


Рис. 13. Зависимость величин $\varphi(\beta_1)$ и $\psi(\beta_1)$ от коэффициента β_1 .

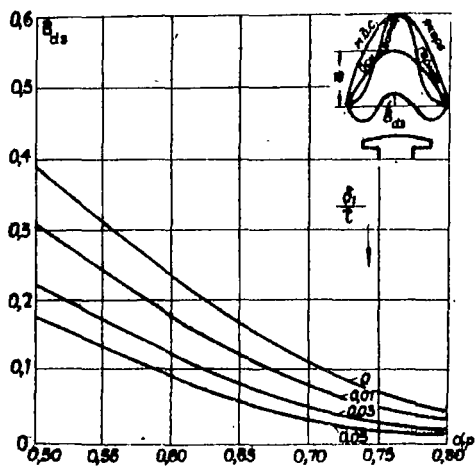


Рис. 14. Зависимость величины B_{d3} от коэффициента α_p и отношения δ_1/τ .

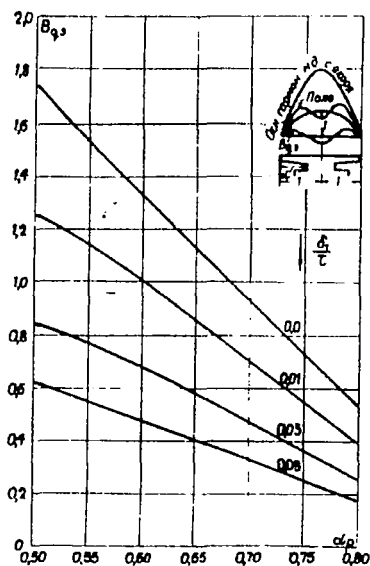


Рис. 15. Зависимость величины B_{q3} от коэффициента α_p и отношения δ_1/τ

67. Суммарные добавочные потери на поверхности ротора

- $P_{доб2}$, кВт :

$$P_{доб2} = P_{пов} + P_{VR} + P_{VZR}.$$

68. Добавочные потери на корпусе машины при холостом ходе

- $P_{к(хх)}$ [70, 90] :

$$P_{к(хх)} = 0,075 \cdot p \cdot \left(\frac{\tau_a}{0,1} \right) \left(\frac{l_1}{0,1} \right) \sqrt{\frac{f_1}{50}} H_{км}^2 \times \left(1 + \frac{2\tau_a}{\pi \cdot l_1} \right) \cdot 10^{-7} \text{ кВт},$$

где

$$\tau_a = \frac{\pi D_a}{2\rho}, \quad \text{и};$$

N_{km} находим по таблице П-5 для B_{a1} [81].

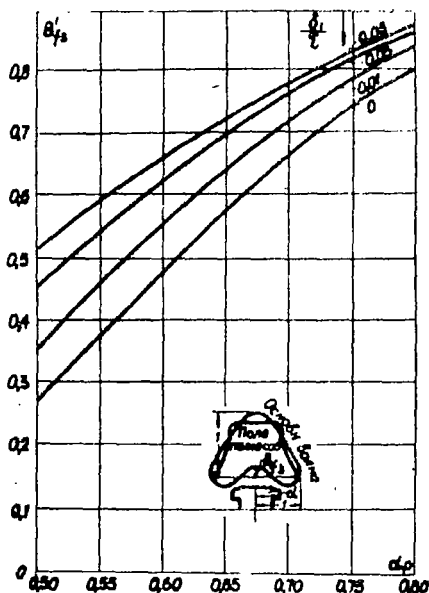


Рис. 16. Зависимость величины B'_{fz} от коэффициента α_p и отношения δ_1/τ

69. Добавочные потери на поверхности щитов и корпуса при к.з. [70, 90]:

$$P_{(щ+к)} = 5\rho \left(\frac{\tau}{0,1}\right)^4 \left(\frac{A}{10^4}\right)^2 \left(\frac{f_1}{500}\right)^{1,5} \left(\frac{2 \cdot 10^5}{\rho_k}\right)^{0,5} 10^{-3} \text{ кВт.}$$

70. Суммарные потери в машине без учета потерь на возбуждение - Σp :

$$\Sigma p = P_{c1} + P_{\text{гоб2}} + P_{z3} + P_{\text{мх}} + P_{\text{м1}} + P_{\text{к(хх)}} P(\psi + \kappa).$$

71. Коэффициент полезного действия без учета потерь на возбуждение - η , %:

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100}{P_2 + \Sigma p}.$$

Если η существенно отличается от ранее принятой величины, производится необходимая корректировка выполненного расчета.

П о л ю с а и в н е ш н и й м а г н и т о -
п р о в о д

72. Расчет угла потерь в пакете статора- $\delta_{\text{мс}}$ [97]:

$$\delta_{\text{мс}} = \alpha z \text{ctg} \quad \tau'_{\text{мс}} / x'_{\text{мс}},$$

где параметры $\tau'_{\text{мс}}$ и $x'_{\text{мс}}$ определяются по формуле

$$Z'_{\text{мс}} = \tau'_{\text{мс}} + j x'_{\text{мс}} = j \frac{\tau''_{\text{мс}} \cdot x''_{\text{мс}}}{\tau''_{\text{мс}} + j x''_{\text{мс}}},$$

$\tau''_{\text{мс}}$ - активное сопротивление :

$$\tau''_{\text{мс}} = \frac{m_1 \cdot U_{\mu}^2}{P_{c1}} 10^{-3} \text{ Ом};$$

$x''_{\text{мс}}$ - индуктивное сопротивление взаимоиндукции :

$$x''_{\text{мс}} = U_{\mu} / I_{\mu} \text{ Ом}.$$

73. Величина полного тока возбуждения статора - I_2^1 , а [99], (рис. 17):

$$I_2' = \sqrt{I_1^2 + I_\mu^2 + 2 I_1 \cdot I_\mu \sin(\beta - \delta_{\mu c})}.$$

74. Величина угла θ_1' , град [77]:

$$\theta_1' = \frac{(P_2 + P_{\text{мх}} + P_{\delta\alpha\delta 2}) \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_\mu \cdot I_2}.$$

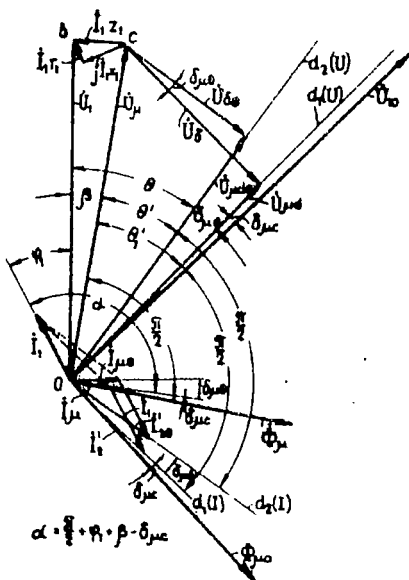


Рис. 17. Совмещенная векторная диаграмма синхронных электродвигателей неявнополюсного и явнополюсного исполнения.

75. Величина коэффициента K_d' с учетом дополнительных воздушных зазоров и междупольного рассеяния:

$$K_d' = \frac{K_d}{1 + K_f R_{\delta g} / R_{\delta}},$$

где K_d определяется по рис. 18 в соответствии с α_p и δ_1/a [54];

a - расстояние между полюсами разной полярности (рис. 19);

K_f определяется по рис. 20 в соответствии с α_p и δ_1/a [54];

$R_{\delta g} = \frac{R_{\delta} \cdot R_g}{R_{\delta} + R_g}$ - результирующее магнитное сопротивление индуктора ротора, I/ом сек;

$R_{\delta} = \frac{1}{\mu_0 \lambda_{\delta} D_p}$ - магнитное сопротивление междуполюсного пространства, I/ом сек;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}$ - магнитная проницаемость воздуха, гн/м;

λ_{δ} - удельная магнитная проводимость междуполюсного пространства машины с числом пар полюсов $p = 2, 3$, предварительно определяется по рис. 21 [38]; уточненная величина λ_{δ} может быть определена по методике, изложенной в [75].

Для двухполюсных машин значение λ_{δ} можно рассчитывать по формуле

$$\lambda_{\delta} = \frac{S_{\text{вп}}}{a_1 \cdot D},$$

где $S_{\text{вп}}$ - площадь поверхности полюса, обращенной в сторону полюса противоположной полярности (рис. 22);

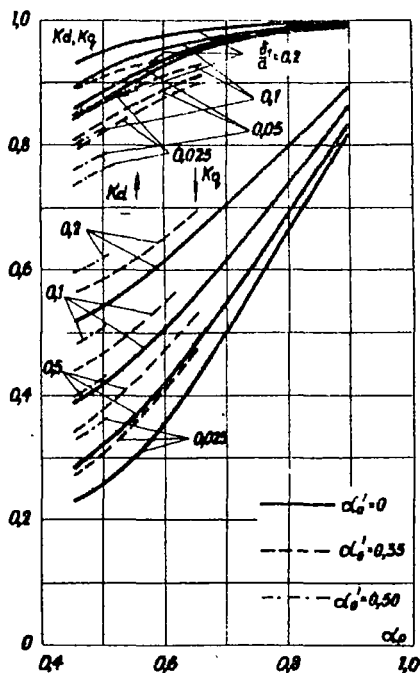


Рис. 18. Зависимость величин K_d и K_q от коэффициента α_p для прямых ($\alpha'_0 = 0$), трапециевидальных ($\alpha'_0 = 0,35$) и треугольных ($\alpha'_0 = 0,5$) полюсов.

α_1 - расстояние между внутренними плоскостями $\delta_{вп}$ разноименных полюсов.

$D_p = D - 2\delta_1$ - диаметр ротора, м ;

$R_g = \frac{2p \delta_g}{\mu_0 \pi D_g L_g}$ - магнитное сопротивление дополнительных воздушных зазоров, I/ом сек [99, 101];

D_g, L_g, δ_g - соответственно диаметр, длина цилиндрической поверхности ротора в зоне дополнительного воздушного зазора и величина дополнительного воздушного зазора ;

$R_\delta = \frac{2pK\delta_1\delta_2}{\mu_0 K_d D l_\delta}$ - магнитное сопротивление основного воздушного зазора, I/ом сек [99].

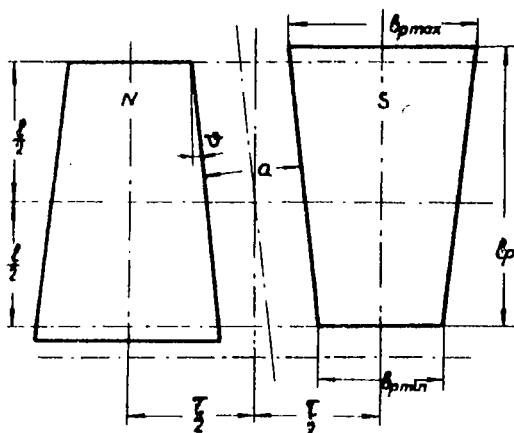


Рис. 19. К определению коэффициентов K_d и K_q .

76. Величина отношения K_d'/K_q ,

где K_q находится по рис. 18.

77. Величина $\alpha_{dq} \cdot K_d'/K_q$,

где α_{dq} находится по рис. 23.

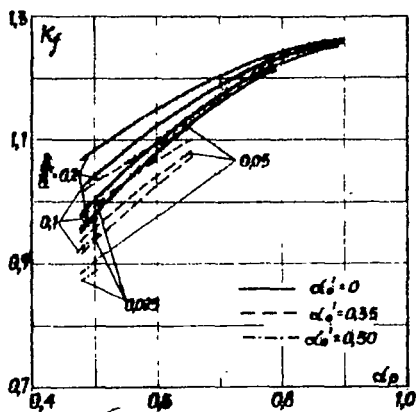
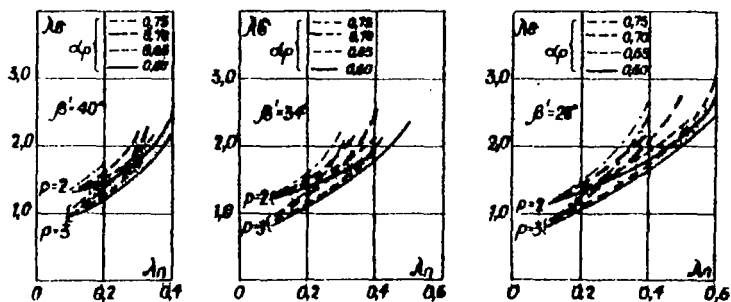


Рис. 20. Зависимость величины K_f от коэффициента для прямых ($\alpha'_0 = 0$), трапецидальных ($\alpha'_0 = 0,35$) и треугольных ($\alpha'_0 = 0,5$) полюсов.



Ис. 21. К определению удельной магнитной проводимости междуполюсного пространства для машин с $p = 2$ и $p = 3$.

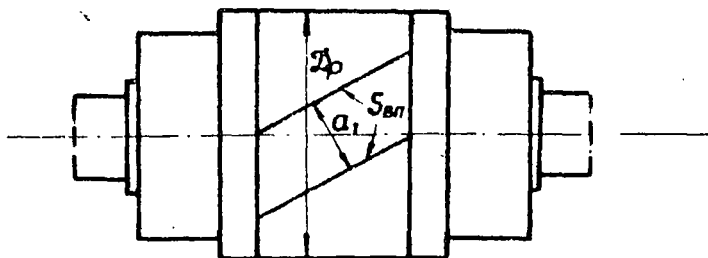


Рис. 22. К определению удельной магнитной проводимости междупольного пространства двухполюсной машины.

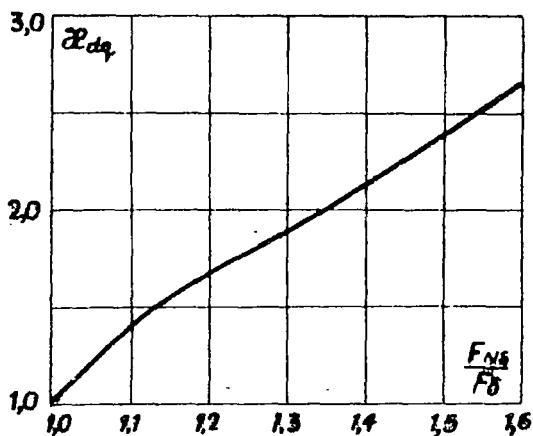


Рис. 23. Зависимость величины λ_{dq} от отношения F_{Ns}/F_δ (по данным [81]).

78. Предварительная величина угла $\delta_{\mu\theta}$, град [97].

Определяется по рис.24 (при этом считается, что

$$\theta'_1 = \theta').$$

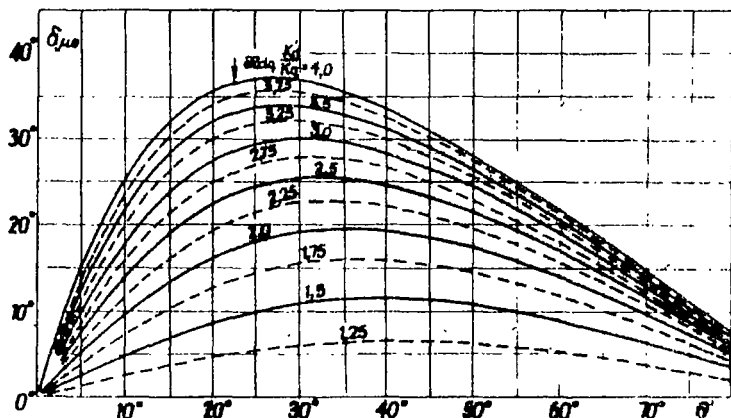


Рис.24. Величина угла $\delta_{\mu\theta}$ в зависимости от угла рассогласования θ' и величины $x_{dq} \frac{K'_d}{K_q}$.

79. Предварительная величина угла θ' , град:

$$\theta' = \theta'_1 - \delta_{\mu\theta}.$$

80. Уточнение величин углов $\delta_{\mu\theta}$ и θ' .

По рис.24 при помощи кривой, соответствующей значению

$x_{dq} \frac{K'_d}{K_q}$ (поз.77), определяются соответствующие друг другу величины углов θ' и $\delta_{\mu\theta}$, которые в сумме дают угол θ'_1 (поз.74), т.е. $\theta' + \delta_{\mu\theta} = \theta'_1$.

81. Величина угла θ , град:

$$\theta = \theta' + \beta.$$

82. Результирующая э.д.с. по продольной оси машины - $U_{\mu d}$, в:

$$U_{\mu d} = U_{\mu} \cdot \cos \theta',$$

то же в относительных единицах:

$$U_{\mu d} = U_{\mu d} / U_1.$$

83. Продольная м.д.с. реакции якоря - F_{ad} , а:

$$F_{ad} = K_{ad} \cdot F_a \cdot \sin \psi,$$

где

$$F_a = 2.7 \frac{W_1 f w_1}{p} I_1, \text{ а};$$

$$\psi = \varphi + \theta' + \beta,$$

K_{ad} определяется по рис. 25 в соответствии с величинами α_p и δ_1/a [54].

84. Междуполусная м.д.с. при номинальной нагрузке - F_{NSH} , а:

$$F_{NSH} = F_{NS} + F_{ad}.$$

85. Принимаем конструкцию машины

(например, изображенную на рис.26) .

86. Магнитный поток в цилиндре ротора под нагрузкой - $\Phi_{пн}$, вб:

$$\Phi_{пн} = p \Phi_{\delta d} + F_{NSH} \cdot \lambda_{\delta} \cdot \mu_0 \cdot D_p,$$

где $\Phi_{\delta d} = \Phi \cdot U_{\mu d}^*, \text{ вб}.$

87. Коэффициент рассеяния индуктора - σ_n :

$$\sigma_n = \frac{\Phi_{пн}}{p \cdot \Phi_{\delta d}}.$$

88. Сечение цилиндра ротора - S_u , м^2 .

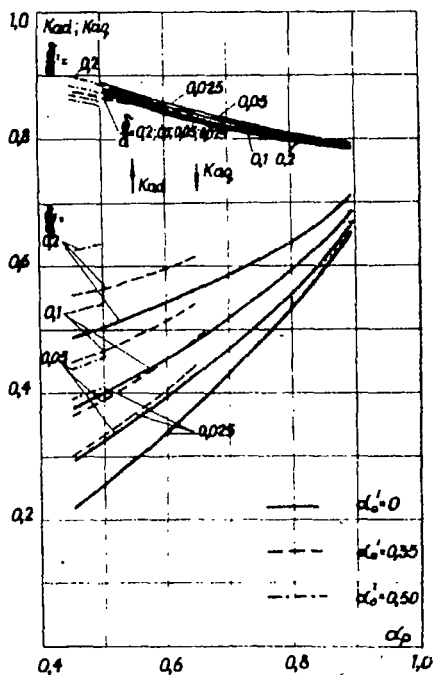


Рис. 25. Зависимость величин $K_{ад}$ и $K_{аг}$ от коэффициента для прямых ($\alpha'_0 = 0$), трапецидальных ($\alpha'_0 = 0,35$) и треугольных ($\alpha'_0 = 0,5$) полюсов.

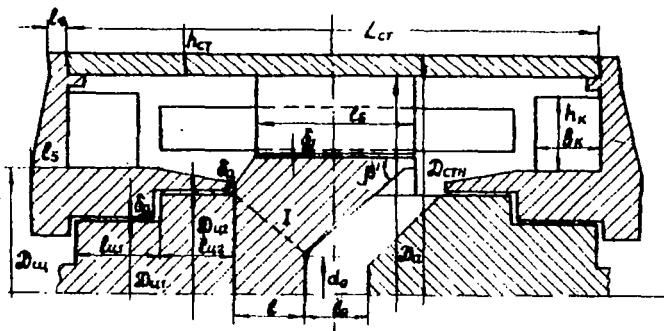


Рис. 26. Пример компоновки бесконтактного синхронного двигателя с внешним магнитопроводом.

89. Сечение цилиндрического вытупа подшипникового щита - $S_{\text{вщ}}, \text{м}^2$.

90. Сечение подшипникового щита у входа в торцевую часть - $S_{\text{вщт}}, \text{м}^2$.

91. Сечение подшипникового щита в зоне замка - $S_{\text{щз}}, \text{м}^2$.

92. Расчетное среднее сечение подшипникового щита - $S_{\text{щ}}, \text{м}^2$:

$$S_{\text{щ}} = \frac{S_{\text{вщт}} + S_{\text{щз}}}{2}.$$

93. Сечение станины - $S_{\text{ст}}, \text{м}^2$.

94. Сечение полюса - $S_{\text{к}}, \text{м}^2$.

95. Длина магнитной силовой линии в станине - $l_{\text{ст}}, \text{м}$.

96. Длина магнитной силовой линии в цилиндрах ротора - $l_{\text{ц}}, \text{м}$.

97. Длина магнитной силовой линии по двум полюсам ротора - $l_{\text{к}}, \text{м}$.

98. Длина магнитной силовой линии по двум подшипниковым щитам - $l_{\text{щ}}, \text{м}$.

99. Магнитная индукция в станине - $B_{\text{ст}}, \text{тл}$:

$$B_{\text{ст}} = \Phi_{\text{пн}} / S_{\text{ст}}.$$

100. М.д.с. станины - $F_{\text{ст}}, \text{а}$:

$$F_{\text{ст}} = l_{\text{ст}} \cdot H_{\text{ст}},$$

где $H_{\text{ст}}$ выбираем по таблице П-5 [81] в соответствии с величиной магнитной индукции $B_{\text{ст}}, \text{тл}$.

101. Магнитная индукция в подшипниковых щитах - $B_{\text{щ}}, \text{тл}$:

$$B_{\text{щ}} = \Phi_{\text{пн}} / S_{\text{щ}}.$$

102. М.д.с. подшипниковых щитов - $F_{щ}$, а:

$$F_{щ} = l_{щ} \cdot H_{щ} ,$$

где $H_{щ}$ определяем по таблице П-5 [81] в соответствии с $B_{щ}$, тл.

103. Магнитная индукция в цилиндрах ротора - $B_{ц}$, тл:

$$B_{ц} = \Phi_{пн} / S_{ц} .$$

104. М.д.с. цилиндров ротора - $F_{ц}$, а:

$$F_{ц} = l_{ц} \cdot H_{ц} ,$$

где $H_{ц}$ определяем по таблице П-5 [81] для $B_{ц}$, тл.

105. Магнитная индукция в полюсах ротора - $B_{к}$, тл:

$$B_{к} = \Phi_{пн} / S_{к} .$$

106. М.д.с. полюсов ротора - $F_{к}$, а:

$$F_{к} = l_{к} \cdot H_{к} ,$$

где $H_{к}$ находим по таблице П-5 [81] для $B_{к}$, тл.

107. Магнитная индукция в дополнительных воздушных зазорах - $B_{\delta g}$, тл:

$$B_{\delta g} = \Phi_{пн} / S_{\delta g} .$$

108. М.д.с. дополнительных воздушных зазоров - $F_{\delta g}$, а:

$$F_{\delta g} = 1,6 \cdot B_{\delta g} \cdot \delta g \cdot 10^6 .$$

109. М.д.с. возбуждения электродвигателя при нагрузке -

$$F_{\theta н} , а:$$

$$F_{\theta н} = F_{нзп} + F_{ст} + F_{щ} + F_{ц} + F_{к} + F_{\delta g} .$$

О б м о т к а в о з б у ж д е н и я

110. Количество витков обмотки возбуждения - W_k .

Выбираем предварительно, с учетом системы питания

и конструкции обмоток возбуждения:

$$W_{\delta} = 2 \cdot W_k.$$

III. Ток возбуждения - I_{δ} , а:

$$I_{\delta} = \frac{K_{\delta\delta} \cdot F_{\delta n}}{2 \cdot W_k},$$

где $K_{\delta\delta} = 1,1 + 1,15$ - коэффициент запаса, учитывающий технологию изготовления машины и отклонение параметров активных материалов магнитопровода.

II2. Плотность тока в обмотке возбуждения - Δ_{δ} , а/м².

Ориентировочно можно принять $\Delta_{\delta} = (2,2 + 2,5) 10^6$ а/м². Большие значения относятся к коротким машинам с сравнительно малыми плотностями тока в статорной обмотке.

II3. Сечение и марка провода обмотки возбуждения - S_{δ} , мм².

Марка провода в зависимости от класса нагревостойкости обмоток проектируемой машины выбирается, например, по таблицам, приведенным в [81, 92]. Диаметр провода и сечение, близкое к расчетному, с учетом ранее выбранной марки провода выбираются по таблице IV-1 [81].

II4. Площадь поперечного сечения катушки обмотки возбуждения - $S_{к\delta}$, мм²:

$$S_{к\delta} = W_k \cdot d_{\delta \text{из}}^2 \cdot K_p,$$

где K_p - коэффициент разбухания катушки:

$$K_p = 1,1 + 1,25.$$

II5. Ширина катушки - b_k , м.

Выбирается из конструктивных соображений.

II6. Высота катушки - h_k , м:

$$h_k = S_{kb} / b_k .$$

II7. Внутренний диаметр катушки возбуждения - D_{kb} , м.

II8. Наружный диаметр катушки возбуждения - D_{kn} , м:

$$D_{kn} = D_{kb} + 2 \cdot h_k .$$

II9. Длина провода обмотки возбуждения - L_b , м:

$$L_b = 2 \pi \cdot D_{cp} \cdot W_k ,$$

где D_{cp} , м - средний диаметр катушки возбуждения:

$$D_{cp} = D_{kb} + h_k .$$

II20. Сопротивление обмотки возбуждения при расчетной температуре, ом (см. п. I) :

$$r_b = \frac{L_b}{\gamma \cdot S_b} .$$

II21. Мощность потерь в обмотке возбуждения - P_b , кВт:

$$P_b = I_b^2 \cdot r_b \cdot 10^{-3} .$$

II22. Напряжение возбуждения - U_b , в:

$$U_b = I_b \cdot r_b .$$

II23. Суммарные потери в машине - $\Sigma p'$, кВт:

$$\Sigma p' = \Sigma p + P_b .$$

II24. Коэффициент полезного действия электродвигателя - η ,

% :

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100}{P_2 + \Sigma p'} .$$

П р и м е р

Р а с ч е т б е с к о н т а к т н о г о с и н -
х р о н н о г о э л е к т р о д в и г а т е л я
м о щ н о с т ь ю 10 квт

1. Но м и н а л ь н ы е д а н н ы е

Мощность номинальная $P_H = 10$ квт
Число фаз $m_1 = 3$
Напряжение сети линейное $U_L = 380$ в
Частота сети $f = 50$ гц
Скорость вращения синхронная $n = 1500$ об/мин
Коэффициент мощности $\cos \varphi = 1,0$
Соединение фаз обмотки статора . $Y/\Delta = 380/220$ в

2. Но м и н а л ь н ы е в е л и ч и н ы и о с н о в н ы е р а з м е р ы

1. Число пар полюсов- p :

$$p = \frac{60f_1}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

2. Фазовый ток статора - I_1 :

$$I_1 = \frac{P_H}{\eta \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} \cdot U_L} = \frac{10 \cdot 10^3}{0,895 \cdot 1 \cdot \sqrt{3} \cdot 380} = 17 \text{ а.}$$

3. Расчетная мощность - P' :

$$P' = \frac{K_E \cdot P_H}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{0,96 \cdot 10}{0,895 \cdot 1} = 10,7 \text{ ква,}$$

где $K_E = 0,96.$

4. Внутренний диаметр расточки статора - D :

$$D = 1,15 : 0,39 \sqrt[3]{\frac{C_A \cdot P^I}{\Lambda \cdot n}} = 1,15 : 0,39 \sqrt[3]{\frac{(6,0+8,2) \cdot 10,7}{0,65 \cdot 1500}} =$$

$$= 0,182 + 0,202 \text{ м.}$$

Принимаем $D = 0,18 \text{ м.}$

5. Наружный диаметр пакета статора - D_a :

$$D_a = (1,61 + 1,56) \cdot D = (1,61 + 1,56) 0,18 = 0,29 + 0,28 \text{ м.}$$

Выбираем железо 6-го габарита

$$D_a = 0,291 \text{ м.}$$

6. Число пазов на полюс и фазу - q_1 .

Принимаем $q_1 = 3$.

7. Число пазов статора - Z_1 :

$$Z_1 = 2p \cdot m_1 \cdot q_1 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36.$$

8. Полюсное деление, выраженное в пазах, - τ_n :

$$\tau_n = \frac{Z_1}{2 \cdot p} = \frac{36}{2 : 2} = 9.$$

9. Полюсное деление статора - τ :

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,18}{2 : 2} = 0,141 \text{ м.}$$

10. Зубцовое деление статора - t_{z1} :

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,18}{36} = 0,0157 \text{ м.}$$

11. Главный воздушный зазор - δ_1 .

Выбираем $\delta_1 = 0,9 : 10^3 \text{ м.}$

12. Шаг обмотки по пазам - y_n :

$$y_n = \frac{Z_1}{2 \cdot p} \mp \varepsilon = \frac{36}{2 \cdot 2} - 2 = 7; \quad (1 \rightarrow 8).$$

13. Коэффициент укорочения шага - β_1 :

$$\beta_1 = y_n / \tau_n = 7/8 = 0,778.$$

14. Коэффициент скоса пазов - $K_{СК}$.

$$\text{Принимаем } K_{СК} = 1.$$

15. Обмоточный коэффициент - K_{w1} :

$$K_{w1} = \frac{0,5}{q_1 \sin \frac{30^\circ}{q_1}} \sin \beta_1 \frac{\pi}{2} = \frac{0,5}{3 \cdot \sin 10^\circ} \sin 0,778 \frac{\pi}{2} =$$

$$= 0,94 \cdot 0,957 = 0,90.$$

16. Коэффициент полюсного перекрытия - α_p .

Принимаем ротор с трапецеидальными наконечниками

$$\alpha_p = 0,65.$$

17. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия - α_δ и коэффициент формы кривой - K_B .

Находим по рис. 6.7 $\alpha_\delta = 0,76$ и $K_B = 1,165$ для

$$\alpha_p = 0,65 \text{ и } \frac{\delta}{\tau} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3}}{0,141} = 0,64 \cdot 10^{-2} =$$

$$= 0,0064.$$

18. Индукция в главном воздушном зазоре - $B_{\delta 1}$ и линейная нагрузка - A .

$$\text{Выбираем } B_{\delta 1} = 0,603 \text{ тл и } A = 2,81 \cdot 10^4 \text{ а/м}$$

(см. рис. 10).

19. Расчетная длина статора - l_{δ} :

$$l_{\delta} = \frac{0,61 \cdot P' \cdot 10^4}{\alpha_{\delta} \cdot K_B \cdot K_{w1} \cdot B_{\delta 1} \cdot A \cdot D^2 \cdot n} =$$

$$= \frac{0,61 \cdot 10,7 \cdot 10^4}{0,76 \cdot 1,165 \cdot 0,9 \cdot 0,603 \cdot 2,81 \cdot 10^4 \cdot 0,18^2 \cdot 1500} =$$

$$= 0,10 \text{ м.}$$

20. Магнитный поток полюса - Φ :

$$\Phi = \alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta} \cdot B_{\delta 1} = 0,76 \cdot 0,141 \cdot 0,10 \cdot 0,603 =$$

$$= 0,00646 \text{ вб.}$$

21. Число витков в фазе - W_1 ;

$$W_1 = \frac{K_E U_1}{4 \cdot K_B \cdot K_{w1} f_1 \Phi} = \frac{0,86 \cdot 220}{4 \cdot 1,165 \cdot 0,9 \cdot 50 \cdot 0,00646} =$$

$$= 156 \text{ витков.}$$

22. Число витков в секции - W_c :

$$W_c = \frac{m_1 W_1}{Z_1} = \frac{3 \cdot 156}{36} = 13 \text{ витков.}$$

23. Уточнение величины линейной нагрузки - A :

$$A = \frac{I_1 \cdot 6 \cdot W_1}{\pi \cdot D} = \frac{17 \cdot 6 \cdot 156}{0,18} = 2,81 \cdot 10^4 \text{ а/м.}$$

24. Уточнение величины магнитной индукции - $B_{\delta 1}$:

$$B_{\delta 1} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot \tau \cdot l_{\delta}} = \frac{0,00646}{0,76 \cdot 0,141 \cdot 0,10} = 0,604 \text{ тл.}$$

25. Форма паза и основные его размеры.

Выбираем паз рис. 27, а :

$$b = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad b' = 11,6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$h'_n = 27 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad h_{ш} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b_{ш} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

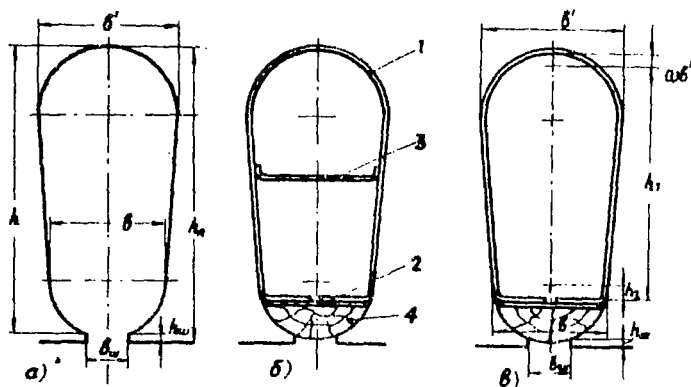


Рис. 27. Паз электродвигателя $P_2 = 10$ кВт, 360 в, 1500 об/мин.

26. Пазовая изоляция и изоляционные материалы статорной обмотки.

Выбираем класс изоляции В (рис. 27, б):

I - пазовая изоляция, выполненная последовательно от стенки паза одним слоем электронита толщиной $0,2 \cdot 10^{-3}$ м; одним слоем гибкого миканита толщиной $0,2 \cdot 10^{-3}$ м и одним слоем стеклолакоткани толщиной $0,15 \cdot 10^{-3}$ м;

2 - прокладка под клин, выполненная из стеклотекстолита толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м ;

3-междуслойная изоляция, выполненная так же, как и пазовая изоляция (см.п.I),но все ее части склеены лаком ПЭ-993 .

27. Площадь паза за вычетом пазовой изоляции и площади клина - S_n' :

$$S_n' = \frac{b' + b - 2b_{uz}}{2} \left[h - \frac{b + b'}{2} - h_{uz} \right] + \frac{\pi(b' - b_{uz})^2}{8} + \frac{\pi b^2}{8} - S_{кл} =$$

$$= \frac{8,7 + 11,6 - 1,1}{2} \left[27 - \frac{8,7 + 11,6}{2} - 2,1 \right] +$$

$$+ \frac{\pi(11,6 - 0,55)^2}{8} + \frac{\pi 8,7^2}{8} - 20 = 200,2 \text{ мм}^2 = 0,20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

28. Плотность тока в статорной обмотке - Δ_a .

$$\text{Принимаем } \Delta_a = 4,61 \cdot 10^6 \text{ а/м}^2.$$

29. Сечение проводника фазы статора - S_a !

$$S_a = \frac{I_1}{a_1 \cdot \Delta_a} = \frac{17,0}{3 : 4,61 \cdot 10^6} = 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

30. Марка провода и его размеры.

$$\text{Марка провода ПЭТВ } d/d_{uz} = 1,25 \cdot 10^{-3} / 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\text{и } S_a = 1,227 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

31. Коэффициент заполнения свободной площади паза статора - K_3 :

$$K_3 = \frac{n_n \cdot d_{uz}^2}{S_n} = \frac{78 \cdot 1,33^2 \cdot 10^{-6}}{0,20 \cdot 10^{-3}} = 0,69.$$

32. Средняя длина обмотки статора - l_{cp} :

$$l_{cp} = 2 (l_\delta + l_{\lambda 1}) = 2(0,10 + 0,185) = 0,57 \text{ м},$$

где

$$l_{\lambda 1} = K_s \cdot \tau + 2 \cdot B = 1,3 \cdot 0,127 + 0,02 = 0,185 \text{ м},$$

$$\tau_y = \frac{\beta_1 \pi (D + h_n)}{2p} = 0,778 \frac{\pi (0,18 + 0,028)}{2 \cdot 2} = 0,127 \text{ м}.$$

33. Длина вылета лобовых частей - l_B :

$$l_B = K_B \cdot \tau_y + B = 0,4 \cdot 0,127 + 0,01 = 0,061 \text{ м}.$$

34. Длина обмотки фазы статора - L_ϕ :

$$L_\phi = l_{cp} \cdot W_1 \cdot 10^{-2} = 0,57 \cdot 156 = 89 \text{ м}.$$

35. Сопротивление фазы обмотки статора постоянному току при 348°К (75°C) :

$$\tau = \frac{L_\phi}{\delta \cdot a_1 \cdot S_a} = \frac{89}{46 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 1,227 \cdot 10^{-6}} = 0,527 \text{ ом}.$$

36. Коэффициент проводимости пазового рассеяния - $\lambda_{\pi 1}$:

$$\begin{aligned} \lambda_{\pi 1} &= \frac{h_1}{3\delta} K_\beta + \left(0,785 - \frac{b_{\omega 1}}{2\delta} + \frac{h_2}{\delta} + \frac{h_{\omega 1}}{\delta_{\omega 1}} \right) K'_\beta = \\ &= \frac{22 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3}} 0,88 + \left(0,785 - \frac{3,7 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3}} - \right. \end{aligned}$$

$$- \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{8,7 \cdot 10^{-3}} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{3,7 \cdot 10^{-3}}) 0,85 = 1,38,$$

где

$$h_1 = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м и } h_2 = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м (см. рис. 27в).}$$

37. Коэффициент воздушного зазора - K_δ :

$$K_\delta = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \delta_1 \cdot \chi_1} = \frac{1,57 \cdot 10^{-3}}{1,57 \cdot 10^{-3} - 1,86 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}} = 1,12,$$

где

$$\chi_1 = \frac{(\delta_{ш1}/\delta_1)^2}{5 + \delta_{ш1}/\delta_1} = \frac{(3,7 \cdot 10^{-3}/0,9 \cdot 10^{-3})^2}{5 + 3,7 \cdot 10^{-3}/0,9 \cdot 10^{-3}} = 1,86.$$

38. Проводимость дифференциального рассеяния - λ_{g1} :

$$\begin{aligned} \lambda_{g1} &= \frac{t_{z1} (q_1 K_{w1})^2}{\delta_1 \cdot K_\delta} \cdot \frac{\rho_{g1} \cdot K_{ш1}}{\sigma_{g1} \cdot K_c} = \\ &= 0,9 \cdot \frac{1,57 \cdot 10^{-3} \cdot (3 \cdot 0,9)^2 \cdot 1 \cdot 0,968}{0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1,12} \cdot 0,011 \cdot 0,9 = \\ &= 0,98, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} K_{ш1} &\approx 1 - 0,033 \frac{\delta_{ш1}^2}{t_{z1} \cdot \delta_1} = \\ &= 1 - 0,033 \frac{(3,7 \cdot 10^{-3})^2}{15,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}} = 0,968. \end{aligned}$$

39. Проводимость рассеяния лобовых частей обмотки статора

$$- \lambda_{\lambda 1}:$$

$$\lambda_{n1} = \frac{0,955 \cdot q_1 \cdot K_p^2 \cdot \tau_L \cdot K_A \cdot K_{AB}}{\ell_8} =$$

$$= \frac{0,955 \cdot 3 \cdot 0,94^2 \cdot 0,163 \cdot 0,502 \cdot 1,1}{0,10} = 2,28,$$

где

$$K_p = \frac{0,5}{q_1 \sin 30^\circ / q_1} = \frac{0,5}{3 \sin 10^\circ} = 0,94 ;$$

$$\tau_L = \frac{\pi D_L}{2 \cdot p} = \frac{0,208}{2 \cdot 2} = 0,163 \text{ м} ;$$

$$D_L = 0,208 \text{ м} ;$$

$$K_n = \frac{0,5 \cdot \ell_{n1}}{2 \cdot \ell_8 \sqrt{1 + \frac{p \cdot \tau_L}{2 \ell_8}}} = \frac{0,5 \cdot 0,185}{2 \cdot 0,061 \cdot \sqrt{1 + \frac{0,778 \cdot 0,163}{2 \cdot 0,061}}} =$$

$$= 0,502 .$$

40. Суммарная проводимость - $\Sigma \lambda$:

$$\Sigma \lambda = \lambda_{n1} + \lambda_{g1} + \lambda_{n2} = 1,38 + 0,98 + 2,28 = 4,64 .$$

41. Индуктивное сопротивление обмотки статора - $\mathcal{X}_1$:

$$\mathcal{X}_1 = 0,158 \cdot f_1 \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{\ell_8}{p \cdot q_1} \Sigma \lambda =$$

$$= 0,158 \cdot 50 \left(\frac{156}{100} \right)^2 \frac{0,1}{2 \cdot 3} \cdot 4,64 = 1,49 \text{ ом} .$$

42. Полное сопротивление обмотки статора - Z_1 :

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + \mathcal{X}_1^2} = \sqrt{0,527^2 + 1,49^2} = 1,58 \text{ ом} .$$

43. Величина внутреннего напряжения фазы статора - U_{μ} :

$$U_{\mu} = \sqrt{U_1^2 + (I_1 Z_1)^2 - 2U_1 I_1 Z_1 \cos \varphi_1} = \sqrt{220^2 + (17 \cdot 1,58)^2 - 2 \cdot 220 \cdot 17 \cdot 0,527} = 212,5 \text{ в.}$$

44. Величина коэффициента K_E :

$$K_E = \frac{U_{\mu}}{U_1} = \frac{212,5}{220} = 0,965.$$

Корректировки выполненного расчета не требуется, поскольку K_E близок к принятому ранее (см. п. 3) $K_E = 0,96$.

3. Магнитная цепь статора

45. М.д.с. главного воздушного зазора - F_{δ} :

$$F_{\delta} = 1,6 \cdot K_{\delta} \cdot \delta \cdot B_{\delta} 10^6 = 1,6 \cdot 1,12 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} \times \\ \times 0,604 \cdot 10^6 = 972 \text{ а.}$$

46. Ширина зубца статора - b_{z1} :

$$b_{z1} = \frac{\pi(D + 2h_n - \delta')}{Z_1} - \delta' = \\ = \frac{\pi(2,18 + 2 \cdot 0,028 - 0,0116)}{36} = 0,0116 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

47. Индукция в зубцах статора - B_{z1} :

$$B_{z1} = \frac{F_{z1} \cdot B_{\delta 1}}{b_{z1} \cdot K_c} = \frac{15,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,604}{8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 1,25 \text{ тл.}$$

48. М.д.с. зубцов статора - F_{z1} (сталь 9II):

$$F_{z1} = 2 \cdot h_n \cdot H_{z1} = 2 \cdot 22,8 \cdot 10^{-3} \cdot 976 = 44,5 \text{ а.}$$

49. Высота спинки статора - h_{a1} :

$$h_{a1} = \frac{D_a - D - 2 h_{n1}}{2} = \frac{0,291 - 0,18 - 2 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{2} =$$

$$= 27,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

50. Индукция в спинке статора - B_{a1} :

$$B_{a1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{a1} \cdot l_\delta \cdot K_c} = \frac{0,00646}{2 \cdot 27,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,10 \cdot 0,95} =$$

$$= 1,225 \text{ тл.}$$

51. Средняя длина силовой магнитной линии в спинке статора - L_{a1} :

$$L_{a1} = \frac{\pi (D_a - h_{a1})}{2p} = \frac{\pi (0,291 - 28 \cdot 10^{-3})}{2 \cdot 2} = 0,206 \text{ м.}$$

52. М.д.с. спинки статора - F_{a1} :

$$F_{a1} = \xi \cdot H_{a1} \cdot L_{a1} = 0,41 \cdot 910 \cdot 0,206 = 76,8 \text{ а.}$$

53. М.д.с. холостого хода - F_{Ns} :

$$F_{Ns} = F_\delta + F_{z1} + F_{a1} = 972 + 44,5 + 76,8 = 1093,3 \text{ а.}$$

54. Коэффициент насыщения пакета статора - K_μ :

$$K_\mu = \frac{F_{Ns}}{F_\delta} = \frac{1093,3}{972} = 1,13.$$

55. Величина угла $\beta (L \dot{U}_1, \dot{U}_\mu) :$

$$\beta = \arccos \frac{U_1^2 + U_\mu^2 - (I_1 Z_1)^2}{2 U_1 U_\mu} =$$

$$= \arccos \frac{220^2 + 212,5^2 - (17 \cdot 1,58)^2}{2 \cdot 220 \cdot 212,5} = 60^\circ 45'.$$

56. Намагничивающий ток статора - $I_\mu :$

$$I_\mu = 0,474 \frac{P \cdot F_{Ns}}{W_1 \cdot f w_1} = 0,474 \frac{2 \cdot 1093,3}{156 \cdot 0,90} = 7,4 \text{ а.}$$

4. Коэффициент полезного действия без учета потерь в обмотке возбуждения

57. Потери в меди обмотки статора - $P_M :$

$$P_M = m_1 \cdot I_1^2 \cdot z_1 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 17^2 \cdot 0,527 \cdot 10^{-3} = 0,457 \text{ кВт.}$$

58. Потери в стали ярма статора - $P_{cc} :$

$$P_{cc} = 1,6 \cdot P_{cc}^1 \cdot G_{a1} = 1,6 \cdot 5,15 \cdot 16,8 \cdot 10^{-3} = 0,138 \text{ кВт,}$$

где

$$G_{a1} = h_{a1} \cdot l_\delta \cdot K_c \cdot L_{a1} \cdot 2p \cdot \delta_c =$$

$$= 0,0275 \cdot 0,1 \cdot 0,95 \cdot 0,206 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 7800 = 16,8 \text{ кг ;}$$

$$P_{cc}^1 = 5,15 \text{ Вт/кг.}$$

59. Потери в зубцах статора - $P_{cz} :$

$$P_{cz} = 1,8 \cdot P_{cz}^1 \cdot G_{z1} \cdot 10^{-3} = 1,8 \cdot 5,4 \cdot 5,37 \cdot 10^{-3} = 0,052 \text{ кВт,}$$

где

$$G_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot l_\delta \cdot K_c \cdot Z_1 \cdot \delta_c =$$

$$= 0,028 \cdot 0,0072 \cdot 0,1 \cdot 0,95 \cdot 36 \cdot 7800 = 5,37 \text{ кг ;}$$

$$P_{cz}^i = 5,4 \text{ вт/кг.}$$

60. Магнитные потери в пакете статора от основного магнитного поля - P_{c1} :

$$P_{c1} = P_{cc} + P_{cz} = 0,138 + 0,052 = 0,19 \text{ кВт.}$$

61. Механические потери - $P_{мх}$:

$$P_{мх} \approx 0,8 \cdot 2\pi \left(\frac{U}{40} \right)^3 \cdot \sqrt{\frac{l_i}{0,19}} = 0,8 \cdot 4 \left(\frac{14}{40} \right)^3 \sqrt{\frac{0,1}{0,19}} =$$

$$= 0,1 \text{ кВт,}$$

где

$$U = \frac{\pi \cdot D_p \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,178 \cdot 1500}{60} = 14 \text{ м/сек.}$$

62. Магнитная индукция третьей гармоники - B_3 :

$$B_3 = \sqrt{(B_{f3} - B_{d3})^2 + B_{3q}^2} = \sqrt{(-0,0905)^2 + 0,633^2} =$$

$$= 0,638 \text{ тл,}$$

где

$$B_{d3} = B_{d3}^* \cdot B_{\delta 1} = 0,15 \cdot 0,604 = 0,0905 \text{ тл ;}$$

$$B_{q3} = B_{q3}^* \cdot B_{\delta 1} = 1,05 \cdot 0,604 = 0,633 \text{ тл ;}$$

$$B_{f3} = (0,6 - B_{f3}^*) B_{\delta 1} = (0,6 - 0,6) \cdot 0,604 = 0.$$

63. Добавочные потери в зубцах статора при к.з. и f_1 = 50 гц - P_{z3} :

$$P_{z3} \approx 10,7 \cdot P^{10/50} \cdot B_3^{5/4} \cdot G_{z1} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 10,7 \cdot 3,3 \cdot 0,638^{5/4} \cdot 5,37 \cdot 10^{-3} = 0,106 \text{ кВт.}$$

64. Добавочные потери на поверхности ротора при холостом ходе, вызванные зубчатостью статора, - $P_{пов}$:

$$P_{пов} = 2 \cdot p \cdot \tau \cdot \alpha_p \cdot l_p \cdot P_{пов} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 2 \cdot 2 \cdot 0,141 \cdot 0,65 \cdot 0,1 \cdot 2220 \cdot 10^{-3} = 0,0812 \text{ кВт},$$

где

$$P'_{пов} = K_o \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} (B_o \cdot t_{z1})^2 \cdot 10^6 =$$

$$= 23,3 \left(\frac{36 \cdot 1500}{10 \cdot 1000} \right)^{1,5} \cdot (0,176 \cdot 1,57 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10^6 =$$

$$= 2220 \text{ Вт/м}^2 ;$$

$$B_o = \beta_o \cdot K_\delta \cdot B_{\delta 1} = 0,26 \cdot 1,12 \cdot 0,604 = 0,176 \text{ тл}.$$

65. Добавочные потери на поверхности ротора от высших гармоник

- P_{VR} :

$$P_{VR} = 1,4 \cdot 4,5 \cdot 10^{-7} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1,5} \frac{A^2 \cdot \tau^4 \cdot \delta_R}{100 \cdot \delta_1^4} \varphi(\beta_1) =$$

$$= 1,4 \cdot 4,5 \cdot 10^{-7} \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \frac{2,81^2 \cdot 10^8 \cdot 0,141^4 \cdot 0,00364}{(0,9 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 100} \times$$

$$\times 0,5 \cdot 10^{-4} = 0,004 \text{ кВт},$$

где

$$S_R = \pi \cdot D_p \cdot l_p \cdot \alpha_p = \pi \cdot 0,1782 \cdot 0,1 \cdot 0,65 = 0,0364 \text{ м}^2 ;$$

$$D_p = D - 2\delta_1 = 0,18 - 1,8 \cdot 10^{-3} = 0,1782 \text{ м}.$$

66. Добавочные потери от зубцовых полей на поверхности ротора

- P_{VZR} :

$$P_{VZR} = 1,4 \cdot 1,14 \cdot 10^{-7} \frac{A^2 \cdot t_{z1}^4 \cdot K_{w1}^2 (z_1/p)^{1,5} \cdot K_{\theta}^2 \cdot S_R}{100 \cdot \delta_1^2} =$$

$$= 1,4 \cdot 1,14 \cdot 10^{-7} \frac{2,81^2 \cdot 10^8 \cdot 0,0157^4 \cdot 0,9^2 \cdot 181^{1,5} \cdot 0,961}{0,9^2 \cdot 10^{-6} \cdot 100} \times$$

$$\times \frac{0,0364}{0,368} = 0,202 \text{ кВт,}$$

где

$$K_{\theta}^2 = \left(\frac{\alpha \nu}{\sin \alpha \nu} \right)^2 = \left(\frac{0,361}{0,368} \right)^2 = 0,961 ;$$

$$\alpha \nu = \frac{\pi \delta_1}{\tau} \cdot \frac{z_1}{p} = \frac{\pi 0,9 \cdot 10^{-3}}{141 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{36}{2} = 0,361.$$

67. Суммарные добавочные потери на поверхности ротора - $P_{\text{доб2}}$:

$$P_{\text{доб2}} = P_{\text{ноб}} + P_{VR} + P_{VZR} = 0,0812 + 0,004 + 0,202 = 0,2872 \text{ кВт,}$$

68. Добавочные потери в корпусе машины при холостом ходе

- $P_K(xx)$:

$$P_K(xx) = 0,075 p \left(\frac{\tau_0}{0,1} \right) \left(\frac{l_1}{0,1} \right) \sqrt{\frac{f_1}{500}} H_{km}^2 \left(1 + \frac{2\tau_0}{\pi l_1} \right) 10^{-7} =$$

$$= 0,075 \cdot 2 \left(\frac{0,228}{0,1} \right) \left(\frac{0,1}{0,1} \right) \sqrt{0,1} \cdot 910^2 \left(1 + \frac{2 \cdot 0,228}{0,1 \pi} \right) 10^{-7} =$$

$$= 0,022 \text{ кВт,}$$

где

$$\tau_0 = \frac{\pi \cdot D_0}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,291}{4} = 0,228 \text{ м.}$$

69. Добавочные потери на поверхности щитов и корпуса при к.э. :

$$P_{(щ+к)} = 5p \left(\frac{\tau}{0,1} \right)^4 \left(\frac{A}{10^4} \right)^2 \left(\frac{f_1}{500} \right)^{1,5} \left(\frac{2 \cdot 10^5}{A_k} \right)^{0,5} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 5 \cdot 2 \left(\frac{0,141}{0,1} \right)^4 \left(\frac{2,81 \cdot 10^4}{10^4} \right)^2 (0,1)^{1,5} \cdot 10^{-3} \approx 0,010 \text{ кВт.}$$

70. Суммарные потери в машине без учета потерь на возбуждение

$$- \Sigma p :$$

$$\Sigma p = P_{c1} + P_{g0\delta 2} + P_{z3} + P_{mx} + P_{m1} + P_{(xx)} + P_{(ш+к)} =$$

$$= 0,19 + 0,287 + 0,106 + 0,10 + 0,457 + 0,022 + 0,01 =$$

$$= 1,17 \text{ кВт.}$$

71. Коэффициент полезного действия без учета потерь на возбуждение - η :

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100}{P_2 + \Sigma p} = \frac{10}{10 + 1,17} \cdot 100 = 89,6 \%$$

Корректировки выполненного расчета не требуется, поскольку к.п.д. близок к принятому ранее (см. п. 2, $\eta = 89,5 \%$).

5. По л ю с я и в н е ш н и й м а г н и т о -
п р о в о д

72. Угол потерь в пакете статора - $\delta_{\mu c}$:

$$\delta_{\mu c} = \arctg \frac{z'_{\mu c}}{x'_{\mu c}} = \arctg \frac{1,155}{28,7} = \arctg 0,0403 =$$

$$= 2^\circ 20',$$

$$\text{где } Z'_{\mu c} = z'_{\mu c} + j x_{\mu c} = j \frac{z''_{\mu c} \cdot x''_{\mu c}}{z''_{\mu c} + j x''_{\mu c}} =$$

$$= j \frac{713 \cdot 28,7}{713^2 + 28,7^2} \quad (713 - j \quad 28,7) = 1,155 + j \quad 28,7 ;$$

$$Z_{\mu c}'' = \frac{m_1 U_{\mu}^2}{P_{c1}} = \frac{3 \cdot 212,5^2}{0,19} \cdot 10^{-3} = 713 \text{ ом};$$

$$x_{\mu c}'' = \frac{U_{\mu}}{I_{\mu}} = \frac{212,5}{7,4} = 28,7 \text{ ом}.$$

73. Величина полного тока возбуждения статора - I_2' :

$$\begin{aligned} I_2' &= \sqrt{I_1^2 + I_{\mu}^2 + 2 I_1 \cdot I_{\mu} \cdot \sin(\beta - \delta_{\mu c})} = \\ &= \sqrt{17^2 + 7,4^2 + 2 \cdot 17 \cdot 7,4 \sin(60^{\circ}45' - 2^{\circ}20')} = \\ &= 19,1 \text{ а.} \end{aligned}$$

74. Величина угла - θ_1' :

$$\begin{aligned} \theta_1' &= \arcsin \frac{P_2 + P_{\text{мх}} + P_{\text{гобз}}}{m_1 U_{\mu} I_2'} = \arcsin \frac{10 + 0,161 + 0,287}{3 \cdot 212,5 \cdot 19,1} = \\ &= \arcsin 0,859 = 59^{\circ} 12'. \end{aligned}$$

75. Величина коэффициента K_d' :

$$\begin{aligned} K_d' &= \frac{K_d}{1 + K_f \frac{R_{\text{сг}}}{R_0}} = \frac{0,91}{1 + 1,08 \frac{0,495 \cdot 10^5}{1,69 \cdot 10^5}} = \\ &= 0,69, \end{aligned}$$

где

$K_d = 0,91$ найден по рис. 18 для

$\alpha_p = 0,65$ и $\delta_1/a = 0,05$;

$K_f = 1,08$ найден по рис. 20 для

$\alpha_p = 0,65$ и $\delta_1/a = 0,05$;

$$R_{\delta q} = \frac{R_{\delta} \cdot R_q}{R_{\delta} \cdot R_q} = \frac{44,7 \cdot 10^5 \cdot 0,5 \cdot 10^5}{44,7 \cdot 10^5 + 0,5 \cdot 10^5} =$$

$$= 0,495 \cdot 10^5 \text{ I/ом.сек} ;$$

$$R_{\delta} = \frac{1}{\mu_0 \cdot \lambda_{\delta} \cdot D_p} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 0,1782} =$$

$$= 44,7 \cdot 10^5 \text{ I/ом.сек} ;$$

$$R_q = \frac{2\rho \cdot \delta_q}{\mu_0 \cdot S_q} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0319} =$$

$$= 0,5 \cdot 10^5 \text{ I/ом.сек} ;$$

$$S_q = \pi \cdot D_{u1} \cdot l_{u1} + \pi \cdot D_{u2} \cdot l_{u2} =$$

$$= \pi \cdot 0,128 \cdot 0,042 + \pi \cdot 0,096 \cdot 0,05 = 0,0319 \text{ м}^2 ;$$

$$R_{\delta} = \frac{2\rho K_{\delta 1} \delta_1}{\mu_0 K_d D_{\delta 8}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 2 \cdot 1,12 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,91 \cdot 0,18 \cdot 0,1} = 1,69 \cdot 10^5 \text{ I/ом сек} ;$$

$$\lambda_{\delta} = 3 \text{ (см. рис. 2I для } \beta = 40^\circ \text{ и } \alpha_p = 0,65).$$

76. Величина отношения K'_d/K_q :

$$\frac{K'_d}{K_q} = \frac{0,69}{0,54} = 1,28,$$

где $K_q = 0,54$ находим по рис. 18 для $\alpha_p = 0,6$

и $\delta_1/a = 0,05$.

77. Величина коэффициента $\mathcal{K}_{dq} \frac{K'_d}{K_q}$:

$$\mathcal{K}_{dq} \frac{K'_d}{K_q} = 1,5 \cdot 1,28 = 1,92 ,$$

где

$$\mathcal{L}_{dq} = 1,5 \text{ по рис. 23 для } K_M = 1,13.$$

78. Предварительная величина угла $\delta_{\mu\theta}$:

$$\delta_{\mu\theta} = 13^\circ \quad (\text{см. рис. 24}).$$

79. Предварительная величина угла θ' :

$$\theta' = \theta - \delta_{\mu\theta} = 59^\circ 12' - 13^\circ = 46^\circ 12'.$$

80. Уточнение величин углов $\delta_{\mu\theta}$ и θ' :

$$\delta_{\mu\theta} = 18^\circ \text{ и } \theta' = 41^\circ 12'.$$

81. Величина угла θ :

$$\theta = \theta' + \beta = 41^\circ 12' + 6^\circ 45' \approx 48^\circ.$$

82. Результирующая э.д.с. по продольной оси машины - $U_{\mu d}$:

$$U_{\mu d} = U_\mu \cos \theta' = 212,5 \cos 41^\circ 12' = 212,5 \cdot 0,752 = 160 \text{ в,}$$

то же в относительных единицах :

$$U_{\mu d}^* = \frac{U_{\mu d}}{U_1} = \frac{160}{220} = 0,726.$$

83. Продольная м.д.с. реакции якоря - F_{ad} :

$$F_{ad} = K_{ad} \cdot F_a \cdot \sin \psi = 0,84 \cdot 3210 \sin 48^\circ = 2000 \text{ а,}$$

где

$$F_a = 2,7 \frac{W_1 \cdot f_{W1}}{p} I_1 = 2,7 \frac{156 \cdot 0,9}{2} I_7 = 3210 \text{ а;}$$

$$\psi = \varphi + \theta' + \beta = \theta = 48^\circ ;$$

$K_{ad} = 0,84$ определяем по рис. 25 для $\alpha_p = 0,65$ и

$$\delta_1/a = 0,05.$$

84. Междуполюсная м.д.с. при номинальной нагрузке - F_{NSH} :

$$F_{NSH} = F_{NS} + F_{ad} = 1093,3 + 2000 = 3093,3 \text{ а.}$$

85. Принимаем конструкцию машины, показанную на рис. 26.

86. Магнитный поток в цилиндре ротора под нагрузкой - Φ_{PH} :

$$\begin{aligned} \Phi_{PH} &= \rho \Phi \delta_d + \rho \cdot F_{NSH} \cdot \lambda_6 \cdot \mu_0 \cdot D_p = \\ &= 2 \cdot 0,0047 + 2 \cdot 3093,3 \cdot 3 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,1782 = 0,0136 \text{ вб,} \end{aligned}$$

где

$$\Phi \delta_d = U_{pud}^* \Phi = 0,726 \cdot 0,00646 = 0,0047 \text{ вб.}$$

87. Коэффициент рассеяния индуктора - σ_H :

$$\sigma_H = \frac{\Phi_{PH}}{\rho \Phi \delta_d} = \frac{0,0136}{2 \cdot 0,0047} \approx 1,45.$$

88. Сечение первого цилиндра ротора - $S_{ц1}$ (см. рис. 26) :

$$S_{ц1} = \frac{\pi}{4} D_{1ц}^2 = \frac{\pi}{4} 0,096^2 = 0,00724 \text{ м}^2.$$

89. Сечение второго цилиндра ротора - $S_{ц2}$:

$$S_{ц2} = \frac{\pi}{4} D_{2ц}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0,128^2 = 0,01285 \text{ м}^2.$$

90. Сечение цилиндрического выступа подшипникового щита первой ступени - $S_{бщ1}$:

$$\begin{aligned} S_{бщ1} &= \frac{\pi}{4} [D_{щ}^2 - (D_{ц1} + 2\delta_g)^2] = \\ &= \frac{\pi}{4} [0,158^2 - (0,096 + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3})^2] = 0,01215 \text{ м}^2, \end{aligned}$$

где $\delta_g = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм - дополнительный воздушный зазор.

91. Сечение цилиндрического выступа подшипникового щита второй ступени - $S_{\delta_{\text{щ}2}}$:

$$\begin{aligned} S_{\delta_{\text{щ}2}} &= \frac{\pi}{4} [D_{\text{щ}}^2 - (D_{\text{щ}2} + 2\delta_g)^2] = \\ &= \frac{\pi}{4} [0,158^2 - (0,128 + 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3})^2] = 0,00835 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

92. Сечение подшипникового щита у входа в торцевую часть зоны дополнительного зазора - $S_{\text{щт}}$:

$$S_{\text{щт}} = \pi \cdot D_{\text{щ}} \cdot l_5 = \pi \cdot 0,158 \cdot 0,0245 = 0,01215 \text{ м}^2.$$

93. Сечение подшипникового щита у замка станины - $S_{\text{щст}}$:

$$S_{\text{щст}} = \pi \cdot (D_{\sigma} - 0,04) \cdot l_4 = \pi (0,291 - 0,04) \cdot 0,0135 = 0,01215 \text{ м}^2.$$

94. Сечение станины - $S_{\text{ст}}$:

$$\begin{aligned} S_{\text{ст}} &= \frac{\pi [D_{\text{стн}}^2 - (D_{\sigma} - 0,04)^2]}{4} = \\ &= \frac{\pi [0,313^2 - (0,291 - 0,004)^2]}{4} = 0,01215 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

95. Сечение I у основания когтя ротора - $S_{\text{к}}$:

$$S_{\text{к}} = 0,0134 \text{ м}^2.$$

96. Длина силовой магнитной линии в станине - $l_{\text{ст}}$:

$$l_{\text{ст}} = L_{\text{ст}} + h_{\text{ст}} = 0,33 + 0,013 = 0,343 \text{ м},$$

где

$L_{ст} = 0,33 \text{ м}$ - длина станины (см. рис. 26) ;

$h_{ст} = 0,013 \text{ м}$ - толщина станины.

97. Средняя длина силовой магнитной линии по двум цилиндрам ротора - $\ell_{ц}$:

$$\ell_{ц} = 2 \cdot (\ell_{ц1} + \ell_{ц2}) = 2 \cdot (0,046 + 0,054) = 0,2 \text{ м.}$$

98. Средняя длина силовой магнитной линии по двум ногам ротора - $\ell_{к}$:

$$\ell_{к} = 2 \cdot \ell_{к1} = 2 \cdot 0,05 = 0,1 \text{ м.}$$

99. Средняя длина силовых магнитных линий по двум подшипниковым щитам - $\ell_{щ}$:

$$\ell_{щ} = 2 \cdot \ell_{щ1} = 2 \cdot 0,08 = 0,16 \text{ м.}$$

100. Магнитная индукция в станине - $B_{ст}$:

$$B_{ст} = \frac{\Phi_{пн}}{S_{ст}} = \frac{0,0136}{0,01215} = 1,12 \text{ тл.}$$

101. М.д.с. станины - $F_{ст}$:

$$F_{ст} = H_{ст} \cdot \ell_{ст} = 1127 \cdot 0,343 = 386 \text{ а.}$$

102. Магнитная индукция в подшипниковых щитах - $B_{щ}$:

$$B_{щ} = \frac{\Phi_{пн}}{S_{щ}} = \frac{0,0136}{0,01215} = 1,12 \text{ тл.}$$

103. М.д.с. подшипниковых щитов - $F_{щ}$:

$$F_{щ} = H_{щ} \cdot \ell_{щ} = 1127 \cdot 0,16 = 180 \text{ а.}$$

104. Магнитная индукция в цилиндре ротора - $B_{ц}$:

$$B_{ц} = \frac{\Phi_{пн}}{S_{ц1}} = \frac{0,0136}{0,01285} = 1,06 \text{ тл.}$$

105. М.д.с. цилиндров ротора - $F_{ц}$:

$$F_{ц} = H_{ц} \cdot \ell_{ц} = 1022 \cdot 0,2 = 204,4 \text{ а.}$$

106. Магнитная индукция в когтях ротора - $B_{к}$:

$$B_{к} = \frac{\Phi_{пн}}{S_{к}} = \frac{0,0136}{0,0134} = 1,01 \text{ тл.}$$

107. М.д.с. когтей - $F_{к}$:

$$F_{к} = H_{к} \cdot \ell_{к} = 938 \cdot 0,1 = 93,8 \text{ а.}$$

108. Магнитная индукция в дополнительных воздушных зазорах

- $B_{\delta g}$:

$$B_{\delta g} = \frac{\Phi_{пн}}{S_g} = \frac{0,0136}{0,0319} = 0,427 \text{ тл.}$$

109. М.д.с. дополнительных воздушных зазоров - $F_{\delta g}$:

$$F_{\delta g} = 1,6 \cdot B_{\delta g} \cdot \delta_g \cdot 10^6 = 1,6 \cdot 0,427 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 340 \text{ а.}$$

110. М.д.с. возбуждения электродвигателя под нагрузкой

- $F_{\theta н}$:

$$F_{\theta н} = F_{нсн} + F_{ст} + F_{щ} + F_{ц} + F_{к} + F_{\delta g} = 3093,3 + 386 + 180 + 204,4 + 93,8 + 340 = 4297,5 \text{ а.}$$

6. Обмотка возбуждения

III. Количество витков обмотки возбуждения - W_B

Выбираем $W_B = 2 \cdot W_K = 2 \cdot 500 = 1000$ витков.

II2. Ток возбуждения - I_B :

$$I_B = \frac{1,14 \cdot F_{BH}}{W_B} = \frac{1,14 \cdot 4297,5}{1000} = 4,9 \text{ а.}$$

II3. Сечение и марка провода обмотки возбуждения.

Провод марки ПЭТВ $d/d_{us} = 1,68 \cdot 10^{-3} / 1,79 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$

$$S_B = 2,22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

II4. Плотность тока в обмотке возбуждения - Δ_B :

$$\Delta_B = \frac{I_B}{S_B} = \frac{4,9}{2,22 \cdot 10^{-6}} = 2,2 \cdot 10^6 \text{ а/м}^2.$$

II5. Площадь поперечного сечения катушки обмотки возбуждения γ
- S_{KB} :

$$S_{KB} = W_K \cdot d_{uzKp}^2 = 500 \cdot 1,79^2 \cdot 1,2 = 0,00192 \text{ м}^2.$$

II6. Ширина катушки обмотки возбуждения - b :

Принимаем $b = 0,042 \text{ м.}$

II7. Высота катушки обмотки возбуждения - h_K :

$$h_K = \frac{S_{KB}}{b_K} = \frac{0,00192}{0,042} = 0,046 \text{ м.}$$

II8. Средний диаметр катушки возбуждения - D_K :

$$D_K = D_{ш} + h_K = 0,158 + 0,046 = 0,204 \text{ м.}$$

И19. Длина провода обмотки возбуждения - L_b :

$$L_b = 2 \cdot \pi \cdot D_k \cdot W_k = 2 \cdot \pi \cdot 0,204 \cdot 500 = 640 \text{ м.}$$

И20. Сопротивление обмотки возбуждения - Z_b при 348°K (75°C) :

$$Z_b = \frac{L_b}{\gamma \cdot S_b} = \frac{640}{46 \cdot 10^6 \cdot 2,22 \cdot 10^{-6}} = 6,27 \text{ ом.}$$

И21. Мощность потерь обмотки возбуждения - P_b :

$$P_b = I_b^2 \cdot Z_b = 4,9^2 \cdot 6,27 \cdot 10^{-3} = 0,15 \text{ кВт.}$$

И22. Напряжение питания обмотки возбуждения - U_b :

$$U_b = I_b \cdot Z_b = 4,9 \cdot 6,27 = 30,7 \text{ в.}$$

И23. Суммарные потери в машине с учетом потерь в обмотке возбуждения - $\Sigma P'$:

$$\Sigma P' = \Sigma P + P_b = 1,17 + 0,15 = 1,32 \text{ кВт.}$$

И24. Коэффициент полезного действия электродвигателя - η :

$$\eta = \frac{P_2 \cdot 100}{P_2 + \Sigma P'} = \frac{10}{10 + 1,32} \cdot 100 = 88,5 \text{ \% .}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. К о о т е н к о М.П., К о н и к Б.Е. Определение основной и третьей гармоник поля якоря и поля полюсов явнополюсной синхронной машины. - Электричество, 1951, 3.
2. А п о и т В.В. Особенности магнитной цепи синхронной машины без оокользящих контактов. - Изв. АН ЛатвССР, 1957, 4.
3. А п о и т В.В. Некоторые вопросы проектирования синхронных машин с когтеобразными полюсами. - В кн.: Системы электроснабжения транспортных средств, I. Рига, Изд-во АН Латв ССР, 1958.
4. К у ц е в а л о в В.М. Учет изменения рассеяния магнитной цепи индуктора синхронной машины при нагрузке. - В кн.: Системы электроснабжения транспортных средств, I. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1958.
5. П о о т н и к о в И.М., П а в л о в В.М., Б е р т о к Ф.А. Методы расчета параметров, поверхностных потерь и нагрева синхронных и асинхронных машин с массивным ротором. - Вестник электропромышленности, 1958, 6.
6. П о о т н и к с в И.М. Вихревые токи в синхронных и асинхронных машинах с массивным ротором. - Электричество, 1958, 10.
7. А п о и т В.В. Синхронные машины с когтеобразными полюсами. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1959.
8. А п с и т В.В. Геометрия когтеобразных полюсов. - В кн.: Системы электроснабжения транспортных средств, вып. 2, Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1959.

9. А п с и т В.В. Добротность магнитопроводов. - В кн.: Системы электроснабжения транспортных средств, П. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1959.
10. К у ц е в а л о в В.М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами. Автореферат канд.дисс. Баку, 1959.
11. Л и т в а к Л.В. Наивыгоднейший соэф синхронных двигателей.-В кн.: Синхронные двигатели. М.-Л., ГЭИ, 1959.
12. С о р о к е р Т.Я. Многофазный асинхронный двигатель. Многофазный асинхронный преобразователь частоты. Поверочный расчет. М., ЦБТИ НИИ электропромышленности, 1959.
13. А п с и т В.В., К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные электродвигатели ДМК-1 и ДМК-2.-Бюллетень технико-экономической информации ВИНТИ РСФСР, 1960, 7.
14. П о с т н и к о в И.М. Проектирование электрических машин. Киев, ГИТЛ, 1960.
15. Т у м а н о в В.Н. Индуктивное сопротивление синхронной машины с внешнезамкнутым магнитным потоком при установившемся симметричном режиме работы. - Вестник электропромышленности, 1960, 10.
16. А п с и т В.В. Классификация бесконтактных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, I. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.
17. К у ц е в а л о в В.М. Конструктивные схемы бесконтактных синхронных электродвигателей. - Научно-техническая конференция по бесконтактным электрическим машинам. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.
18. К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные электродвигатели для привода производственных механизмов. - В кн.:

Бесконтактные электрические машины, I. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.

19. И у л и з а д е К.Н., Х а й к и н И.Е. Синхронные двигатели без машинного возбуждателя. - В кн.: Сб. научно-технической информации, вып. I. Баку, 1961.
20. С и к а Э.К. Упрощенная методика расчета распределения индукции на поверхности расточки статора в синхронных машинах с когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, I. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.
21. Ш т у р м а н Г.И., А п с и т В.В., К р о г е р и с А.Ф. Проблема бесконтактности электрических машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, I. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961.
22. А п с и т В.В. Особые виды симметрии в машинах с когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, 2. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.
23. А п о и т В.В. Коэффициент формы активной поверхности когтеобразного полюса. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, 2. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.
24. А п с и т В.В. Магнитная проводимость междуполюсного рассеяния в машинах с когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, 2. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.
25. А п с и т В.В. Классификация бесконтактных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины. ЦИНИЭЛЕКТРОПРОМ, 1962.
26. В а й в а р с Ю.Ф. Бесконтактные синхронные двигатели с массивными когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтакт-

ные электрические машины. ЦИНТИ, 1962.

27. У р у с о в И.Д., М у р ы г и н А.И., П о л ы ш о в Л.И., Р ы ж к о в В.С. Некоторые особенности бесконтактных синхронных машин с внешнезамкнутым магнитным потоком. - Труды ВНИИЭМ, 1962, 23.
28. К у ц е в а л о в В.М. Опытная серия трехфазных бесконтактных синхронных двигателей. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.
29. К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактный синхронный электродвигатель с внешним магнитопроводом. - Труды Киевского высшего инженерного училища ВВС, 1962, 110.
30. К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные двигатели. - В кн.: Бесконтактные электрические машины. ЦИНТИ-Электропром, 1962.
31. К у ц е в а л о в В.М., Н о в о к ш о н о в Н.А. Бесконтактный синхронный электродвигатель с автоматикой системы возбуждения на полупроводниковых приборах. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, П. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1962.
32. С ы р о м я т н и к о в И.А. Бесконтактные электрические машины. - Материалы I научно-техн. конференции по бесконтактным электрическим машинам. М., 1962.
33. Т у м а н о в В.М. Расчетное и экспериментальное определение сверхпереходных параметров синхронных машин с внешнезамкнутым магнитным потоком. - Вестник электропромышленности, 1962, 6.
34. А п о и т В.В. Синхронные машины с когтеобразными полюсами. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.

35. А п с и т В.В., С и к а Э.К. Внешнее рассеяние когтеобразной полюсной системы. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, Ш. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.
36. А п о и т В.В. Методика выбора основных размеров синхронной машины с когтеобразными полюсами и внешним магнитопроводом. - Доклад на II Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Рига, 1963 (ротапринт).
37. А п с и т В.В. Междуполюсная н.с. синхронной машины. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, Ш. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.
38. А п о и т В.В., С и к а Э.К. Относительная магнитная проводимость междуполюсного рассеяния в машинах с когтеобразными полюсами. - Доклад на II Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Рига, 1963 (ротапринт).
39. Б е р т и н о в А.И., Г о л у б е н к о Я.А. Магнитная проводимость междуполюсного рассеяния когтевых машин. - Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Рига, 1963.
40. Б е р т и н о в А.И., Г о л у б е н к о Я.А. Торцевое рассеяние бесконтактных синхронных машин с внешнезамкнутым потоком. - Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. Рига, 1963.
41. Д а н и л е в и ч Я.Б., К а ш а р о к и й Э.Г. Добавочные потери в электрических машинах. М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.
42. К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные электродвигатели малой и средней мощности. - Электричество,

1963, II.

43. К у ц е в а л о в В.М. Трехфазные бесконтактные синхронные электродвигатели опытной серии СО. ЛатИНТИ, 1963.
44. К у ц е в а л о в В.М. Геометрия магнитной цепи и весовые показатели бесконтактных синхронных электродвигателей. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, III. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.
45. С и к а Э.К. Магнитная проводимость внутреннего рассеяния индуктора с когтеобразными полюсами постоянной ширины. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, III. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1963.
46. А п с и т В.В. Электрические машины с когтеобразными полюсами. Автореф. докт. дисо. Рига, 1964.
47. Т у м а н о в В.И. Определение переходных и сверхпереходных параметров синхронных машин с внешнезамкнутым магнитным потоком. - Электротехника, 1964, 4.
48. А п о и т В.В., Д а у г у л и о Х.Л. Методика выбора основных размеров синхронной машины с когтеобразными полюсами и внутренним магнитопроводом. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, V. Рига, "Зинатне", 1965.
49. А п с и т В.В. Продольное магнитное поле в воздушном зазоре синхронной машины с когтеобразными полюсами трапецеидальной формы. - В кн.: Магнитное поле в электрических машинах. Рига, "Зинатне", 1965.
50. В и т о л и н ь ш Я.А., Г л у х о в В.П., К у ц е в а л о в В.М., О б у ш е в Г.К. Исследование компаундированного бесконтактного синхронного электродвигателя. - Изв. АН ЛатвССР, 1965, 6.

51. Д а у г у л и с Х.Л. Определение веса якоря электрической машины в зависимости от электромагнитных нагрузок. - Изв. АН ЛатвССР, сер. Физ. и техн. наук, 1965, 4.
52. К у ц е в а л о в В.М. Синхронные машины с массивными полюсами. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1965.
53. С и к а Э.К. Магнитное поле в пространстве между якорем и индуктором синхронных машин с когтеобразными полюсами. Канд. дисс. Рига, 1965.
54. С и к а Э.К. Коэффициенты поля возбуждения и реакции якоря для явнополюсной синхронной машины с полюсами переменной ширины. - В кн.: Магнитное поле в электрических машинах. Рига, "Зинатне", 1965.
55. С и к а Э.К. Магнитная проводимость воздушного зазора машины с когтеобразными полюсами. - В кн.: Магнитное поле в электрических машинах. Рига, "Зинатне", 1965.
56. С и к а Э.К. Магнитная проводимость междуполюсного рассеяния когтеобразного индуктора с полюсами переменной ширины. - В кн.: Магнитное поле в электрических машинах. Рига, "Зинатне", 1965.
57. А п с и т В.В. Методика выбора основных размеров синхронной машины с когтеобразными полюсами и внешним магнитопроводом. - Труды II Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам. М., ВНИИЭМ, 1966.
58. В а й в а р с Ю.Ф., С к р у з и т и с К.Э. Синхронные бесконтактные электродвигатели для химической промышленности. - Труды III Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, П. Рига, "Зинатне", 1966.

59. В и т о л и н ь ш Я.А. Определение параметров синхронной машины малой и средней мощности в зависимости от нагрузки. - Труды III Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, П. Рига, "Зинатне", 1966.
60. Л а у ц и с Г.Н. Синхронный двигатель с двукратным использованием магнитного потока и питанием от сети переменного тока с частотой 400 гц. - Труды III Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам, П. Рига, "Зинатне", 1966.
61. О г а н я н Р.В. Поле в воздушном зазоре синхронной машины с учетом насыщения. - Электротехника, 1966, 8.
62. Д а у г у л и с Х.Л. Выбор относительной длины синхронной явнополюсной машины малой мощности. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, У. Рига, "Зинатне", 1967.
63. Д р о з д о в В.А. Влияние поверхностных потерь от вносимых гармонических м.д.с. якоря на механическую характеристику асинхронной машины с массивным ротором. - Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. и техн. наук, 1967, 4.
64. К а л и н ь ш И.Р. Особенности и свойства бесконтактного маховичного синхронного генератора с когтеобразными полюсами и наружным ротором. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УИ. Рига, "Зинатне", 1967.
65. К у ц е в а л о в В.М. Основы теории и методы расчета синхронных и асинхронных машин с массивными элементами магнитных цепей. Автореф. докт. дисс. Рига, 1967.
66. К у ц е в а л о в В.М., В и т о л и н ь ш Я.А. Схемы замещения, относительные характеристики и геометрические места токов синхронных машин. - Изв. АН ЛатвССР, сер.

физ. и техн. наук, 1967, 2.

67. К у ц е в а л о в В.М. Схемы замещения и параметры массивных ферромагнитных проводников при резком проявлении поверхностного эффекта. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УИ. Рига, "Зинатне", 1967.
68. К у ц е в а л о в В.М. Опытная серия трехфазных бесконтактных синхронных электродвигателей. Рига, "Зинатне", 1967.
69. Р а д и о н с в И.Е., С и у н о в Н.С. Угловые характеристики явнополюсной машины с учетом насыщения по двум осям. - Труды Уральского политехнического ин-та, 157. Исследование параметров и цепей возбуждения машин переменного тока. Свердловск, 1967.
70. Р ы ж к о в В.С. Добавочные потери в бесконтактных синхронных машинах с когтеобразным ротором. - Электротехника, 1967, 5.
71. А п с и т В.В. Междуполюсная я.с. и полный поток аксиальной синхронной машины как функции электромагнитных нагрузок. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УП. Рига, "Зинатне", 1968.
72. Д а н и л е в и ч Я.Б., Д о м б р о в с к и й В.В., К о з о в с к и й Е.А. Параметры электрических машин переменного тока. М.-Л., "Наука", 1968.
73. З и л ь б е р ш т е й н Л.А., Р ы ж к о в В.С. Уточнение исходных положений для расчета поля рассеяния когтеобразного ротора. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УП. Рига, "Зинатне", 1968.
74. К у ц е в а л о в В.М., В и т о л и н ь ш Я.А. Об индуктивном сопротивлении реакции якоря явнополюсной

- синхронной машины. - Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. и техн. наук, 1968, 3.
75. Р и ж к с в В.С. Методика расчета магнитной проводимости междуполусного расоеяния в машинах с когтеобразными полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УП. Рига, "Зинатне", 1968.
76. С и к а В.К. Геометрия когтеобразных индукторов. - В кн.: Бесконтактные элентрические машины, УП. Рига, "Зинатне", 1968.
77. А п с и т В.В. Современные проблемы теории беоконтактных электрических машин. - Изв. АН ЛатвССР, 1969, 3.
78. В и т о л и н ь ш Я.А., К у ц е в а л о в В.М. Новая векторная диаграмма явнополюсной машины. - Изв. АН ЛатвССР, 1969, 4.
79. Д а у г у л и с Х.Л. Аналитические выражения для веса и потерь синхронных машин малой мощности. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УШ. Рига, "Зинатне", 1969.
80. Каталог-справочник. Асинхронные электродвигатели единой серии А2 и А02 мощностью от 0,6 до 100 квт. М., Информ-электро, 1969.
81. С е р г е е в П.С., В и н о г р а д о в Н.В., Г о р я и н о в Ф.А. Проектирование электрических машин. М., "Энергия", 1969; 1970.
82. У р у с о в Н.Д., З и л ь б е р ш т е й н Л.А. Поверхностный эффект в массивном рифленном роторе при воздействии зубцовых гармонических магнитного поля. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, УШ. Рига, "Зинатне", 1969.

83. А п с и т В.В. Исторический обзор развития бесконтактных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.
84. В и л ь б е р ш т е й н Л.А. Эквивалентная амплитуда зубцовых пульсаций на поверхности полюсов. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.
85. К о в а л ь к Л.А. О сравнении показателей двигательного и генераторного режимов работы бесконтактных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.
86. К о в а л ь к Л.А. Пути повышения эффективности использования электротехнического оборудования на промышленных предприятиях. Рига, МИПСНХ, 1970 (ротапринт).
87. К у ц е в а л о в В.М., Я г о л к о в о к и й А.К. Синхронный явнополюсный двигатель с возбуждением от третьей гармоники поля. - Изв. АН ЛатвССР, 1970, 5.
88. Л а п ш и н В.К. Проблема учета насыщения в синхронных явнополюсных машинах (обзор предложенных методов). - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.
89. М у р ы г и н А.И. Магнитные системы торцевых бесконтактных синхронных машин с электромагнитным возбуждением. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, IX. Рига, "Зинатне", 1970.
90. Р ы ж к с в В.С. Исследование и расчет магнитного поля и добавочных потерь в бесконтактных синхронных машинах с когтеобразными роторами. Автореф. канд.дисс. М., 1970.

91. У р у с о в И.Д., Р ы ж к о в В.С., З и л ь б е р -
ш т е й н Л.А., В о л ч к о в В.М. Серия бесконтакт-
ных генераторов мощностью до 100 кВт для ветроэлектричес-
ких агрегатов. - Электромеханика, 1970, I.
92. Б а ч е л и с Д.С., Б е л о р у с о в Н.И., С а а -
к я н А.Е. Электрические кабели, провода и шнуры.
Справочник. М., "Энергия", 1971.
93. В и т о л и н ь ш Я.А. Определение насыщенного значе-
ния индуктивного сопротивления реакции якоря синхронной
явнополюсной машины по поперечной оси. - В кн.: Бескон-
тактные электрические машины, Х. Рига, "Зинатне", 1971.
94. Д р о з д о в В.А. Перегрузочная способность синхрон-
ных электродвигателей малой мощности. - В кн.: Бескон-
тактные синхронные машины, Х. Рига, "Зинатне", 1971.
95. Д р о з д о в В.А. Анализ пусковых характеристик син-
хронных электродвигателей с массивными ферромагнитными
полюсами. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, Х.
Рига, "Зинатне", 1971.
96. К о в а л ь к Л.А. О конструкции ротора бесконтактной
синхронной машины. - В кн.: Бесконтактные электрические
машины, Х. Рига, "Зинатне", 1971.
97. К о в а л ь к Л.А. Расчеты электротехнического оборудо-
вания на промышленных предприятиях. Рига, 1971 (рота-
принт).
98. С и к а Э.К. Расчет магнитных потоков рассеяния индук-
тора синхронной машины с консольным когтеобразным рото-
ром. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, Х.
Рига, "Зинатне", 1971.

99. К о в а л ю к Л.А. Об использовании векторных диаграмм при расчете явнополюсных синхронных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, XI. Рига, "Зинатне", 1972.
100. К о в а л ю к Л.А. Определение отдельных потерь в бесконтактных синхронных двигателях. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, XI. Рига, "Зинатне", 1972.
101. К у ц е в а л о в В.М. Синхронные машины в установившихся симметричных режимах. Основы общей линейной теории. Рига, "Зинатне", 1972.
102. К у з н е ц о в Б.И., С о р о к е р Т.Г. Асинхронные электродвигатели мощностью до 400 квт. М., Информэлектро, 1972.
103. В и т о л и н ь ш Я.А., К а н т е р В.К., К у ц е в а л о в В.М. О комплексном сопротивлении реакции якоря синхронных явнополюсных машин. - В кн.: Бесконтактные электрические машины, XI. Рига, "Зинатне", 1972.
104. К о в а л ю к Л.А., К у ц е в а л о в В.М. Бесконтактные синхронные электродвигатели унифицированной серии СДБ мощностью от 1,5 до 40 квт. Рига, "Зинатне", 1973 (ротапринт).

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
1. Основные свойства и некоторые технические данные бесконтактных синхронных двигателей	4
2. Конструктивные особенности бесконтактных синхронных электродвигателей	7
3. Электромагнитный расчет	14
Пример, Расчет бесконтактного синхронного электро- двигателя мощностью 10 квт	50
Литература	75

Виталий Михайлович Куцевалов,
Леонид Александрович Ковалюк

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ВНЕШНИМ МАГНИТОПРОВОДОМ

Редактор А. П у г а ч е в а. Корректор Л. Л ю б и м о в а.
Технический редактор Э. П о ч а. Подписано к печати 28
ноября 1973 г. 5,5 печ.л.; 2,97 уч.-изд.л. Тираж 500 экз.
ЯТ 06473. Цена 18 коп. Издательство "Зинатне", г.Рига, ул.
Тургенева, 19. Отпечатано на ротапринте ФБ АН Латвийской
ССР, г.Рига, ул.Комунала, 4.

Заказ № 195